

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Voditelj rada:

Doc.dr.sc. Suzana Jakovljević

Nada Šućur

Zagreb, 2014.

Sveučilište u Zagrebu  
**Fakultet strojarstva i brodogradnje**

# **ZAVRŠNI RAD**

Nada Šućur

Zagreb, 2014.

## **SAŽETAK**

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama i prisutno je u mnogim obradbenim procesima i konstrukcijama. U radu su opisani različiti mehanizmi trošenja, te su na primjeru klipnjače koljenastog vratila dvotaktnog motora s vanjskim paljenjem definirani mehanizmi trošenja koji se javljaju u njegovom radu. U sklopu eksperimentalnog dijela izvršena je SEM analiza tragova trošenja na klipnjači, analiza kemijskog sastava i ispitivanja tvrdoće.

#### Izjava studenta

Izjavljujem da sam završni rad izradila samostalno i da odgovaram za sve što je u njemu napisano. Ovom prilikom bi se htjela mnogo zahvaliti svojoj mentorici doc.dr.sc. Suzani Jakovljević na strpljenju, izdvojenom vremenu za pomoć, te poticanju na rad i podršci.

Nada Šućur

## SADRŽAJ

I. POPIS SLIKA .....	I
II. POPIS TABLICA .....	IV
III. POPIS OZNAKA .....	V
1. UVOD - TRIBOLOGIJA .....	1
2. POVRŠINE I NJIHOV DODIR .....	3
2.1. Konformni (površinski) dodir .....	4
2.2. Nekonformni (koncentrirani) dodir .....	5
2.3. Tribosustav .....	6
3. TRENJE I TROŠENJE .....	7
3.1. Procesi trenja .....	7
3.1.1. Vrste trenja .....	7
3.1.2. Trenje klizanja .....	8
3.1.1. Trenje kotrljanja .....	9
3.2. Mehanizmi trošenja .....	11
3.2.1. Abrazijsko trošenje .....	11
3.2.2. Adhezijsko trošenje .....	16
3.2.3. Umor površine .....	19
3.2.4. Erozijsko trošenje .....	21
3.2.5. Tribokorozija .....	22
3.2.6. Djelovanje mehanizama trošenja .....	23
3.2.7. Tribološke mjere .....	24

<b>4. MOTOR</b>	25
4.1. Princip rada dvotaktnog motora	26
4.2. Dieslov proces	28
4.3. Ottov proces	29
4.4. Bitne karakteristike	30
<b>5. EKSPERIMENTALNI DIO</b>	32
5.1. Kemijski sastav i mikrostruktura	33
5.2. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) i EDS	35
5.3. Ispitivanje tvrdoće	41
<b>6. ZAKLJUČAK</b>	43
<b>7. LITERATURA</b>	44

## **I. POPIS SLIKA**

Slika 1. Povijesni pronalazak vatre [2] .....	1
Slika 2. Transport kamenih blokova u drevnom Egiptu [3] .....	1
Slika 3. Osnovne vrste odstupanja površine: a) neparalelnost, b) valovitost, c) izbrazdanost, d) hrapavost, e) rezultantna realna površina [4] .....	3
Slika 4. Shematski prikaz struktura površine po dubini [4] .....	4
Slika 5. Konformni dodir [4] .....	5
Slika 6. Hertz-ov dodir dviju kugli [4] .....	5
Slika 7. Shema jednostavnog tribosustava (jedan tribopar) [4] .....	6
Slika 8. Trenje klizanja [4] .....	8
Slika 9. Jedinični događaj procesa klizanja [4] .....	9
Slika 10. Trenje kotrljanja [4] .....	9
Slika 11. Abrazija – jedinični događaj [4] .....	11
Slika 12. Abrazija u dodiru dva tijela [4] .....	12
Slika 13. Abrazija u dodiru tri tijela [4] .....	12
Slika 14. Mikroabraziranje [4] .....	13
Slika 15. Mikrorezanje [4] .....	13
Slika 16. Mikronaprsnuća [4] .....	13
Slika 17. Mikroumor [4] .....	14
Slika 18. “Čista” abrazija [4] .....	14
Slika 19. Izgled površine – “čista” [5] .....	14
Slika 20. Selektivna abrazija [4] .....	15
Slika 21. Izgled površine – selektivna [5] .....	15
Slika 22. “Nulta” abrazija [4] .....	15
Slika 23. Izgled površine – “nulta” [5] .....	15

Slika 24. Jedinični događaj adhezije [4] .....	16
Slika 25. Površina s koje su adhezijom iščupane čestice [6] .....	17
Slika 26. Izgled površine na koju su adhezijom čestice spontano navarene .....	17
Slika 27. Rabinowitz-ova karta tribološke kompatibilnosti [4] .....	18
Slika 28. Jedinični događaj umora površine [4] .....	19
Slika 29. Nastajanje kuglastih čestica u pukotini od umora [7] .....	20
Slika 30. Izgled površine oštećene umorom [8] .....	20
Slika 31. Kuglasta čestica trošenja nastala umorom površine [9] .....	21
Slika 32. Erozijska [10] .....	22
Slika 33. Jedinični događaj tribokorozijske [4] .....	22
Slika 34. Opći oblik procesa trošenja [4] .....	23
Slika 35. Dvotaktni motor (benzinski) [12] .....	26
Slika 36. Usisni takt [13] .....	27
Slika 37. Radni takt [13] .....	27
Slika 38. Radni ciklus dvotaktnog motora (benzinski) [14] .....	27
Slika 39. Dvotaktni (Diesel) motor [15] .....	28
Slika 40. Teoretski dijagram idealiziranog Diesellovog procesa [16] .....	28
Slika 41. Teoretski dijagram dvotaktnog Otto procesa [16] .....	29
Slika 42. Stvarni dijagram dvotaktnog motora [17] .....	30
Slika 43. Wartburg [18] .....	32
Slika 44. Klipnjača i koljenasto vratilo [19] .....	32
Slika 45. Spoj klipnjače i osovine .....	33
Slika 46. Klipnjača izrezana na dijelove .....	33
Slika 47. Mikrostruktura 16Mo5, nagriženo (povećanje 1000 puta) .....	34



Slika 48. Mikrostruktura niskolegiranog krom alatnog čelika, nagriženo (povećanje 1000 puta)	35
Slika 49. Elektroni kod SEM-a [22]	36
Slika 50. Princip rada SEM [22]	36
Slika 51. Tescan Vega TS5136 [23]	37
Slika 52. Dio klipnjače na kojem je obavljena SEM analiza	38
Slika 53. EDS analiza - osnovni materijal klipnjače	38
Slika 54. Cementirani sloj klipnjače	39
Slika 55. EDS analiza – područje gdje je došlo do trošenja	39
Slika 56. SEM analiza – mikrostruktura valjčića	41
Slika 57. Tvrdća po Vickersu (indentor i otisak) [24]	42
Slika 58. Izgled otiska indentora kod Vickers metode [25]	42

## **II. POPIS TABLICA**

Tablica 1. Kemijski sastav analiziranog dijela .....	33
Tablica 2. Maseni i atomski udio pojedinog elementa u osnovnom materijalu .....	39
Tablica 3. Maseni i atomski udio pojedinog elementa na području trošenja .....	41

### **III. POPIS OZNAKA**

<u>Oznaka</u>	<u>Opis</u>	<u>Mjerna jedinica</u>
$A_0$	Nominalna dodirna površina	$\text{m}^2$
$A_r$	Stvarna dodirna površina	$\text{m}^2$
$A_r^i$	Jedinični dodir	$\text{m}^2$
$n$	Broj jediničnih dodira	-
$A_H$	Dodirna površina	$\text{m}^2$
$r$	Polumjeri tijela u dodiru	$\text{m}$
$E$	Modul elastičnosti	$\text{N/mm}^2$
$\mu$	Faktor trenja	-
$F_{tr}$	Sila trenja	$\text{N}$
$F_N$	Normalna sila	$\text{N}$
$\Sigma F_1$	Otpor na elastičnu deformaciju	$\text{N}$
$\Sigma F_2$	Otpor na plastičnu deformaciju	$\text{N}$
$\Sigma F_3$	Otpor na brazdanje	$\text{N}$
$\Sigma F_4$	Otpor na kidanje adhezijskih veza	$\text{N}$
$\mu_{kotr}$	Faktor kotrljanja	-
$G$	Težina	$\text{N}$
$H_a$	Tvrdoća abraziva	$\text{HV}$
$H_l$	Tvrdoća trošene podloge	$\text{HV}$
$v$	Brzina	$\text{m/s}$
$\Delta V$	Promjena volumena	$\text{mm}^3$
$t$	Vrijeme	$\text{t}$
$p$	Tlak	$\text{Pa}$
$V_k$	Zapremina kompresije	$\text{m}^3$

$V_c$	Zapremina cilindra	$\text{m}^3$
$O_e$	Točka kada se otvaraju ispušni kanali	-
$O_s$	Točka kada se otvaraju usisni kanali	-
$d_1$	Duljina dijagonale	mm
$d_2$	Duljina dijagonale	mm
$d$	Srednja vrijednost dijagonale	mm
$HV$	Tvrdoća po Vickersu	HV

## **1.UVOD- TRIBOLOGIJA**

Tribologija je znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnom gibanju, te o pratećim aktivnostima [1]. Radi se o prijevodu službene definicije, objavljene 1966. godine u izvještaju Radne grupe Ministarstva prosvjete i znanosti Ujedinjenog Kraljevstva. Također se može reći da je tribologija znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja [1]. Trenje i trošenje su procesi koje čovjek poznaje još iz pradoba (npr.paljenje vatre, transport, itd.), a mogu biti korisni, ali i štetni.



Slika 1. Povijesni pronalazak vatre [2]



Slika 2. Transport kamenih blokova u drevnom Egiptu [3]

Tako bi bez trošenja bila nemoguća obradba odvajanjem čestica, ali nepoželjno trošenje stvara pak goleme gubitke materijala. Bez trenja bi bilo kakav oblik transporta na zemlji bio onemogućen, ali ono uzrokuje također goleme nepoželjne gubitke energije. Tribologija je interdisciplinarna znanost i crpi znanja iz nekih fundamentalnih znanosti: kemije, fizike, matematike, mehanike, mehanike fluida, metalurgije, znanosti o materijalima i strojarstva.

Glavna područja primjene tribologije su dijelovi mehaničkih konstrukcija (npr. zupčanici, ležaji, klizni elementi, itd.), materijali (npr. novi materijali, keramika, polimeri, metali, itd.), obradba materijala (npr. alatni materijali, sredstva za hlađenje i podmazivanje, lakoobradljivi materijali, itd.), te podmazivanje (npr. ulja, masti, aditivi, itd.).

Tribološke mjere (postupci i metode) koje imaju za cilj postizanje prihvatljivih vrijednosti trenja i trošenja u realnim tribosustavima mogu se podijeliti na: izbor materijala triboelemenata, zaštita površina od trošenja, uhodavanje, podmazivanje.

U mnogim primjenama sve više raste potreba za smanjenjem trenja i trošenja zbog produžetka vijeka trajanja radnih sustava, povećanja efikasnosti radnih sustava, smanjenja troškova održavanja, smanjenja troškova zastoja, poboljšanja pouzdanosti, povećanja sigurnosti, očuvanja oskudnih izvora materijala, očuvanja energije, smanjenja otpada, itd.

Nakon što je objašnjeno na koji način se tribologija bavi problemom trenja i trošenja, u daljnjem tekstu biti će opisani različiti mehanizmi trošenja, te na primjeru klipnjače koljenastog vratila dvotaktnog motora biti će definirani mehanizmi trošenja koji se javljaju u zadanom primjeru.

## **2. POVRŠINE I NJIHOV DODIR**

Trenje i trošenje zbivaju se na dodiru realnih površina koje su u geometrijskom smislu više ili manje neravne ili hrapave.

Razlikujemo sljedeće osnovne vrste odstupanja površine [1]:

1) Makroneravnine (odstupanja od projektirane geometrije i dimenzija proizvoda):

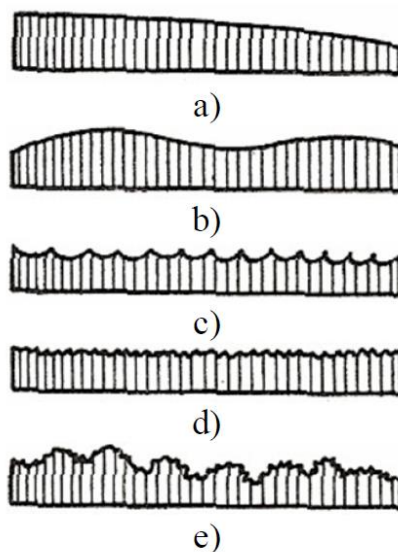
- neparalelnost površina, valovitost

2) Mikroneravnine (posljedica obradnih procesa) :

- izbrazdanost, hrapavost

3) Nanoneravnine (geometrijske granice kristalne ili molekularne strukture, nepravilnosti kristalne strukture)

Sva ova odstupanja površine zajedno daju rezultatnu površinu koja se značajno razlikuje od idealno ravne površine.

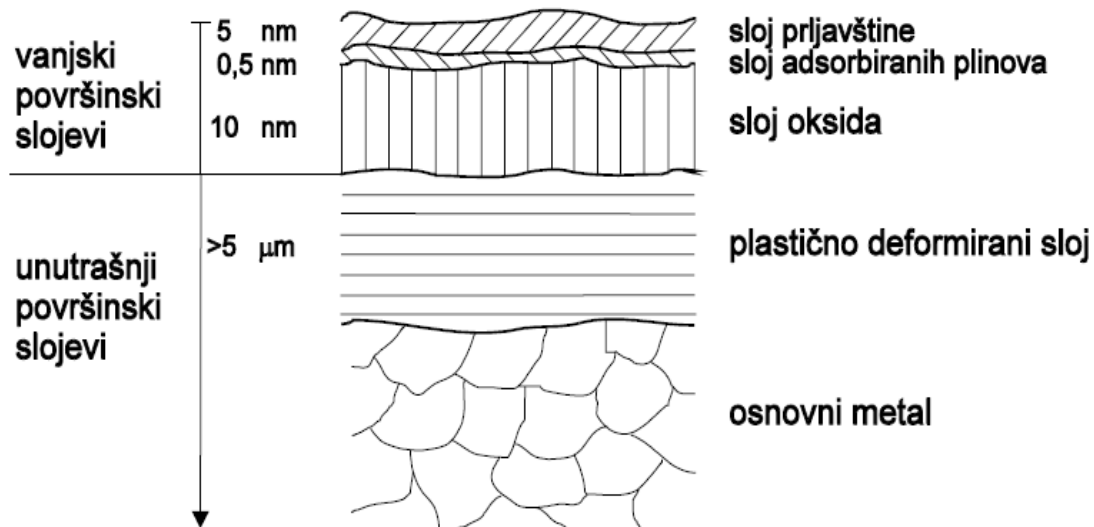


Slika 3. Osnovne vrste odstupanja površine: a) neparalelnost, b) valovitost, c) izbrazdanost, d) hrapavost, e) rezultatna realna površina [4]

Površinska hrapavost obuhvaća odstupanja površine prikazana na slici 2. pod c) i d) pa ju zato definiramo kao sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta (koje su mnogo puta manje od površine cijelog predmeta), a nastale su postupkom obrade.

Potpuna informacija o stanju hrapavosti površine može se dobiti samo ako se mjernim postupkom uzimaju u obzir sva odstupanja koja reprezentiraju hrapavost površine. Stoga ispitivanje tako složenog odstupanja zahtijeva nužna pojednostavljenja kod izbora

karakterističnih veličina koje ju definiraju. Zbog toga se hrapavost površine obično ocjenjuje preko jednodimenzionalnih parametara na osnovi dvodimenzionalnih profila površine. Osim vanjskih obilježja površina, valja računati i s tim da je struktura površine po dubini slojevita [4].



Slika 4. Shematski prikaz struktura površine po dubini [4]

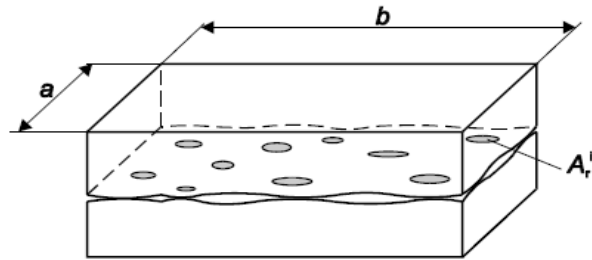
Stvarni dodir dviju površina razlikuje se od prividnog, geometrijskog, te govorimo o dva slučaja [1]:

- 1) Konformni (površinski) dodir
- 2) Nekonformni (koncentrirani) dodir

### **2.1. Konformni (površinski) dodir**

Stvarna dodirna površina mnogo je manja od nominalne kod konformnog dodira. Također znamo da je za tribološke procese važnija stvarna dodirna površina  $A_r$  [1].





$$A_0 = a \cdot b \gg A_r = \sum_{i=1}^n A_r^i$$

$A_0$  - nominalna dodirna površina

$A_r$  - stvarna dodirna površina

$A_r^i$  - jedinični dodir

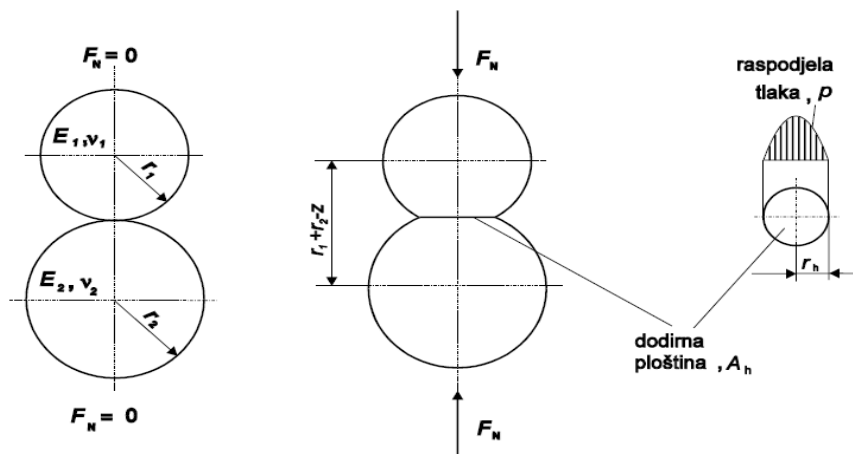
$n$  - broj jediničnih dodira

Slika 5. Konformni dodir [4]

Prema tome uz pretpostavku elastičnih deformacija, Archard definira da je stvarna dodirna površina gotovo linearna normalnoj sili  $F_N$ , a do sličnih zaključaka dolaze Greenwood i Tripp.

## 2.2. Nekonformni (koncentrirani) dodir

Posebno u tehničkim sustavima čest je slučaj dodira tijela zakrivljenih ploha (npr. prstenovi i kuglice kod kugličnih ležajeva, zubi zupčanika, itd.). Takvi dodiri svoju teorijsku osnovu nalaze u Hertz-ovoj teoriji [1].



Slika 6. Hertz-ov dodir dviju kugli [4]

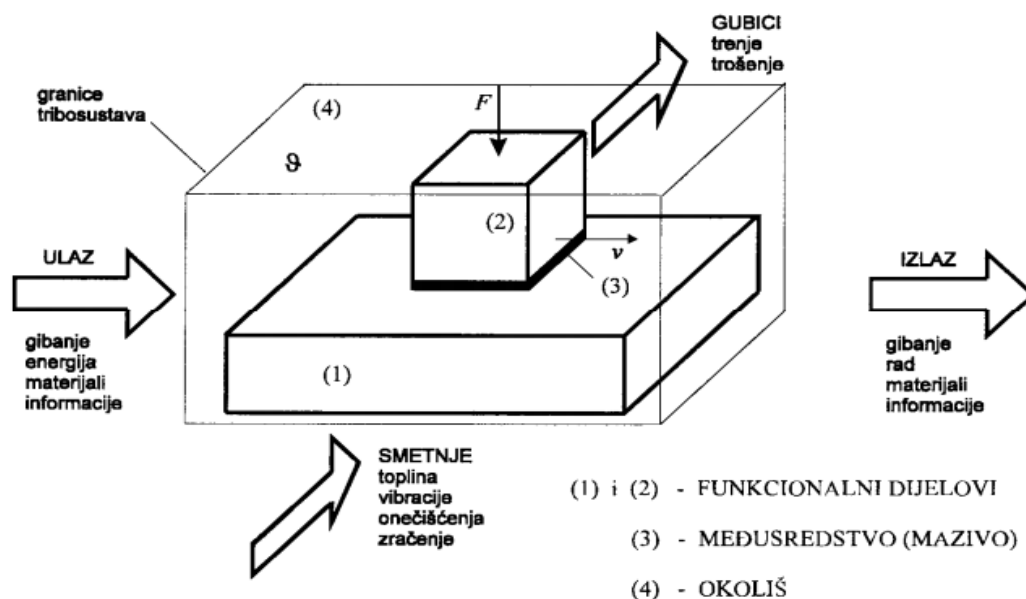
Iz Hertz-ovog proračuna slijedi da je dodirna površina [4]:

$$A_H = \pi r_H^2 = \pi \left( \frac{3r}{2E} \right)^{\frac{1}{3}} F_N^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

Iz ovog zaključujemo da ne postoji idealni točkasti dodir, već se i kod nekonformnog dodira oblikuje dodirna površina  $A_H$  koja ovisi o polumjerima tijela u dodiru  $r$ , njihovu složenu modulu elastičnosti  $E$  i dodirnoj sili koja djeluje normalno na dodirnu površinu  $F_N$ .

### 2.3. Tribosustav

Pri rješavanju triboloških problema treba uzeti u obzir sve dijelove tribosustava, uvjete rada, protok kroz sustav (gibanja, energije, materijala i informacija), smetnje, gubitke i sva važna međudjelovanja.



Slika 7. Shema jednostavnog tribosustava (jedan tribopar) [4]

### **3. TRENJE I TROŠENJE**

#### **3.1. Procesi trenja**

Trenje je sila ili otpor koja se suprotstavlja relativnom kretanju krutih tijela u dodiru. Djeluje paralelno s dodirnim površinama, a smjer joj je suprotan smjeru relativnog kretanja [1]. Riječ trenje dolazi od glagola trti, trljati, *engl.* friction, *lat.* Fricare.

U većini slučajeva, u uređajima i postrojenjima, trenje je štetna i nepoželjna pojava. Na savladavanje sile trenja kao otpora kretanju bilo koje vrste troši se znatna količina mehaničke energije. Kao posljedica trenja na površinama u kontaktu dolazi do trošenja i zagrijavanja materijala površina. Utrošena mehanička energija prelazi u nepoželjnu i izgubljenu toplinsku energiju.

##### **3.1.1. Vrste trenja**

Podjela trenja prema agregatnom stanju tijela u kontaktu [4]:

- 1) Trenje među čvrstim površinama (vanjsko trenje)
- 2) Trenje među dijelovima fluida, odnosno između čvrstog tijela i fluida (tekućinsko trenje ili viskoznost)

Vanjsko trenje se pak dijeli prema podmazivanju na [4]:

- 1) Suho trenje
- 2) Trenje uz podmazivanje

Prilikom pokretanja tijela razlikujemo [4]:

- 1) Trenje mirovanja (statičko trenje)
- 2) Trenje kretanja (dinamičko trenje)

Faktor proporcionalnosti koji povezuje silu trenja i normalnu silu zove se faktor trenja. Često se koristi i naziv koeficijent trenja.

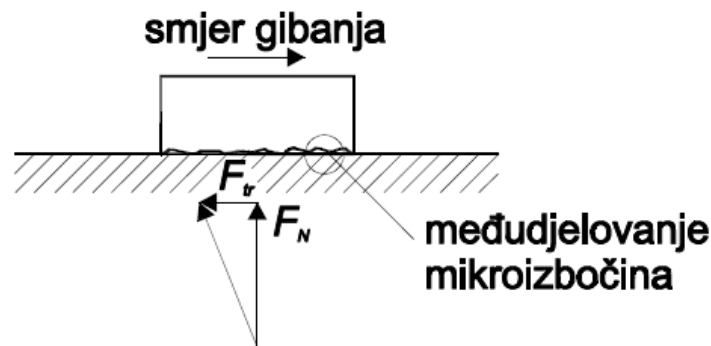
Faktor trenja je dakle bezdimenzijski omjer sile trenja između dva tijela i normalne sile kojom tijela pritišću jedno o drugo [1]:

$$\mu = \frac{F_{tr}}{F_N}$$

(2)

Za ostvarenje relativnog gibanja između dodirnih ploha treba svladati silu trenja. Razlikuju se trenje klizanja i trenje kotrljanja.

### 3.1.2. Trenje klizanja



Slika 8. Trenje klizanja [4]

U slučaju trenja klizanja sila trenja djeluje suprotno smjeru relativnog gibanja. Kod suhog dodira sila trenja proporcionalna je normalnom opterećenju i ne ovisi o nominalnoj dodirnoj površini.

Sila trenja klizanja sastoji se od zbroja 4 komponente koje su i same zbroj pojedinačnih komponentata koje djeluju na svakom dodiru mikroizbočina [4].

$$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 + \Sigma F_3 + \Sigma F_4 \quad (3)$$

$\Sigma F_1$  - otpor na elastičnu deformaciju

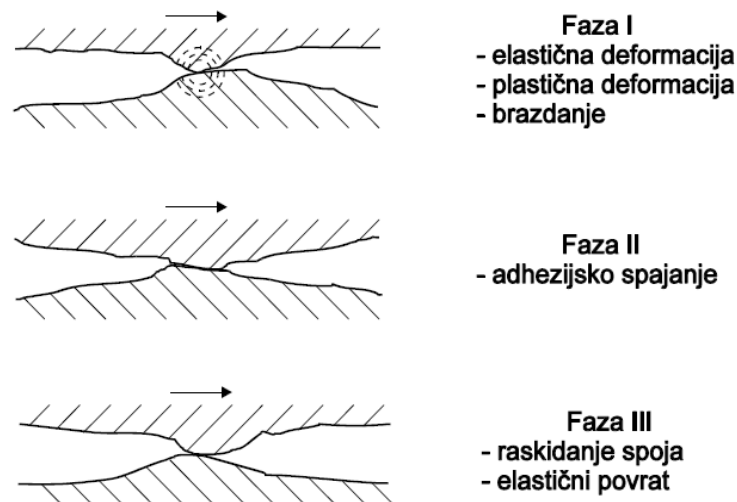
$\Sigma F_2$  - otpor na plastičnu deformaciju

$\Sigma F_3$  - otpor na brazdanje

$\Sigma F_4$  - otpor na kidanje adhezijskih veza

Otpor na elastičnu deformaciju proporcionalan je modulima elastičnosti materijala tarnog para, otpor na plastičnu deformaciju ovisi o njihovim granicama tečenja, otpor na brazdanje ovisi o njihovim duktilnostima, a otpor na kidanje adhezijskih veza ovisi o jačini adhezijske veze uspostavljene između materijala tarnog para.

Slika 9. Prikazuje jedinični događaj procesa klizanja (od početka do završetka dodira jednog para mikroizbočina) kojim se objašnjava porijeklo sile trenja.



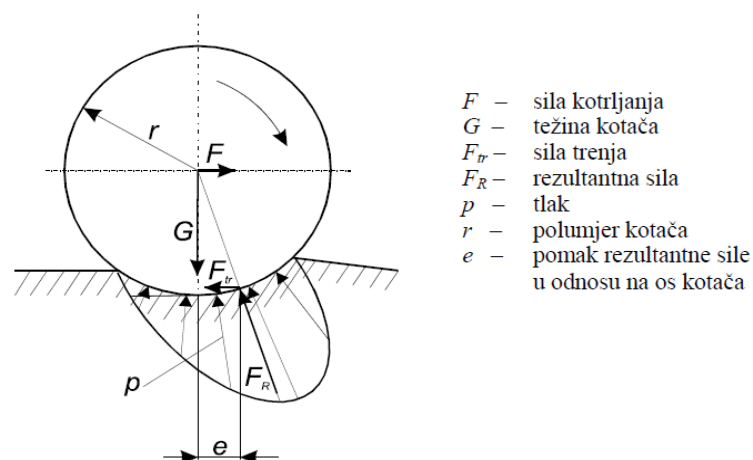
Slika 9. Jedinični događaj procesa klizanja [4]

Na trenje utječu kemijski sastav materijala, stanje obrade površine oba tijela, sastav okoline, opterećenje, brzina kretanja, način kretanja, vrsta kontakta, temperature, prethodno klizanje po toj površini.

### 3.1.3. Trenje kotrljanja

Trenje kotrljanja je otpor što se pojavljuje pri kotrljanju kružnih ploča, kotača ili valjaka. Općenito vrijedi da je ovo trenje mnogo manje nego trenje klizanja. To je zbog toga što u slučaju ovog trenja izostaju komponente sile trenja koje potječu od brazdanja i raskidanja adhezijskih veza. Zato vrijedi [1]:

$$F_t = \Sigma F_1 + \Sigma F_2 \quad (4)$$



Slika 10. Trenje kotrljanja [4]

Izraz koji povezuje silu trenja i normalnu silu (težinu kotača):

$$F_{tr} = \frac{e}{r} G = \mu_{kotr} G \quad (5)$$

Faktor kotrljanja koji je omjer sile otpora i težine, a sličan je faktoru statičkog i kinetičkog trenja, ovisi o brojnim čimbenicima koje je vrlo teško pobrojati i opisati.

U dosadašnjem dijelu ovog poglavlja u kratko su opisane razne vrste i karakteristike trenja jer je za shvaćanje mehanizama trošenja, koji su glavna tema ovog rada, nužno i shvaćanje procesa trenja zbog njihove bliske povezanosti.

### **3.2. Mehanizmi trošenja**

Trošenje je postupni gubitak materijala sa površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Iako između trenja i trošenja u jednom tribosustavu nema jednoznačne veze, u većini slučajeva povećanje trenja prati i intenzivnije trošenje (no može biti i obrnuto) [1].

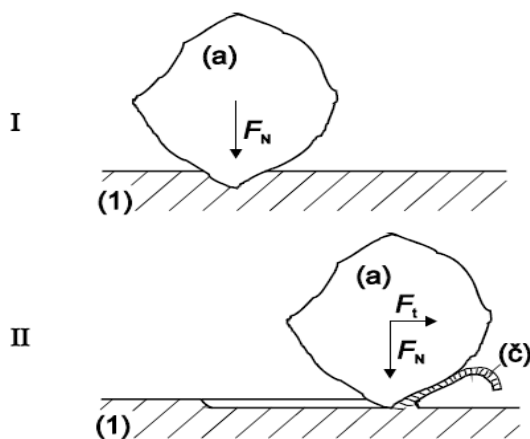
Četiri su osnovna mehanizma trošenja:

- 1) Abrazija
- 2) Adhezija
- 3) Umor površine
- 4) Tribokorozija

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine, te uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina. Upravo oblik čestica trošenja i izgled trošenih površina čine osnovu za identifikaciju mehanizma trošenja.

#### **3.2.1. Abrazijsko trošenje**

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama.



Slika 11. Abrazija – jedinični događaj [4]

Kao što je vidljivo sa slike 11. jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze.

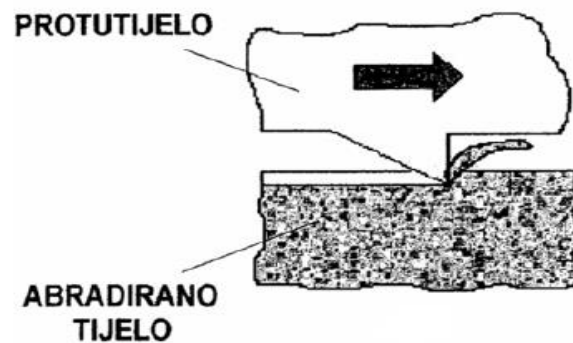
I faza prodiranja abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$ .

II faza istiskivanja materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja  $F_t$ .

Mehanizam abrazije moguće je sagledati s nekoliko različitih gledišta:

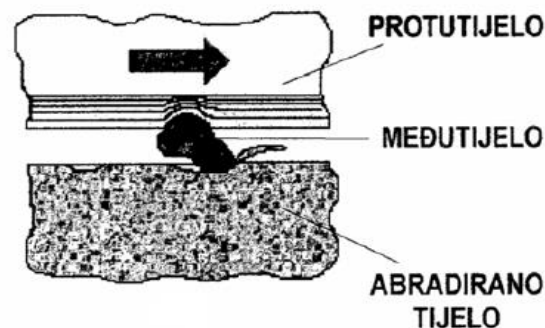
1) Ovisno o strukturi tribosustava u kojem se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije:

a) Abrazija u dodiru dva tijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo)



Slika 12. Abrazija u dodiru dva tijela [4]

b) Abrazija u dodiru tri tijela (abrazivno tijelo, protutijelo, te međutijelo koja se slobodno gibaju između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski)

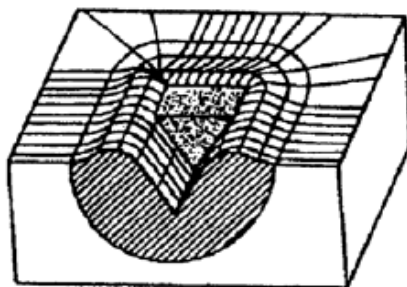


Slika 13. Abrazija u dodiru tri tijela [4]

2) Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine to su [4]:

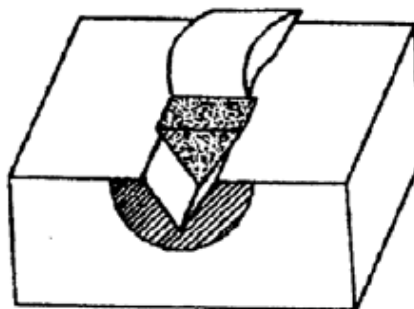
a) Mikrobrazdanje - odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice (no rubovi brazde odvajaju se od površine u obliku produkata trošenja).





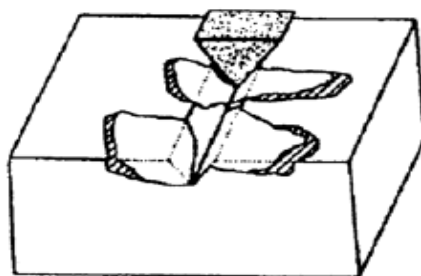
Slika 14. Mikrobrazdanje [4]

b) Mikrorezanje – odnošenje materijala jednako volumenu zareza nastalog prolaskom abrazivne čestice.



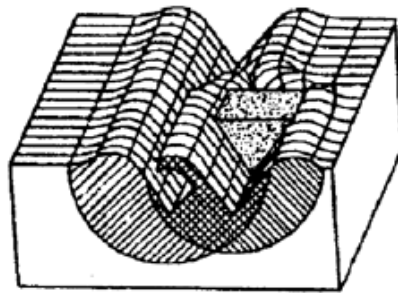
Slika 15. Mikrorezanje [4]

c) Mikronaprsnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina. Pri tome se s površine odnose veliki djelići materijala.



Slika 16. Mikronaprsnuća [4]

d) Mikroumor - odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine.

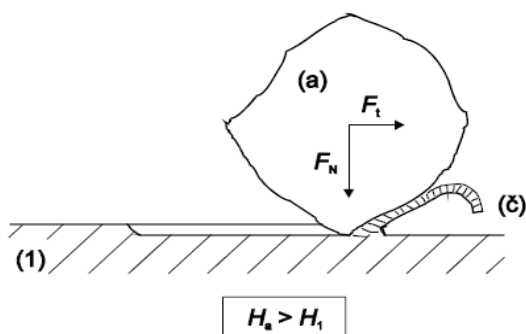


Slika 17. Mikroumor [4]

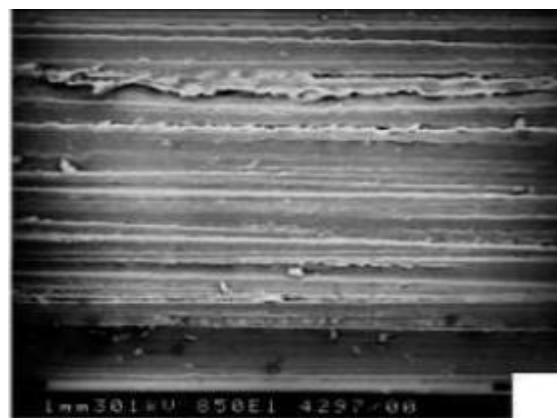
3) Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja:

- a) "Čista" abrazija
- b) Selektivna abrazija
- c) "Nulta" abrazija

"Čista" abrazija nastupa kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge. Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine u slučaju kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine kada je abradirani materijal krhak.

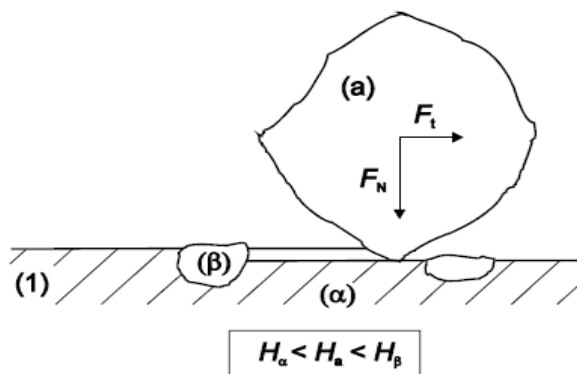


Slika 18. "Čista" abrazija [4]

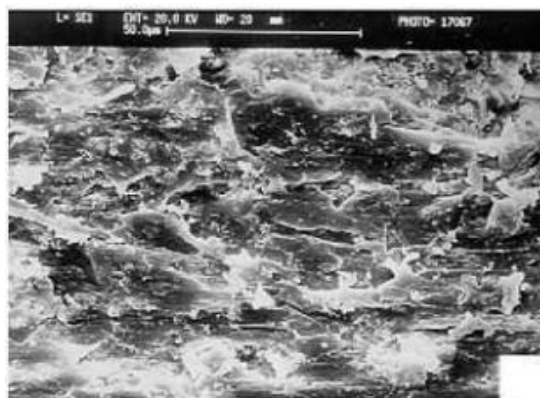


Slika 19. Izgled površine – "čista" [5]

Selektivna abrazija nastupa kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv reže samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze. Među česticama trošenja pojavit će se povremeno i zrna tvrde faze, kada trošenjem mekše faze izgube uklještenje i budu izbačena iz trošene površine.

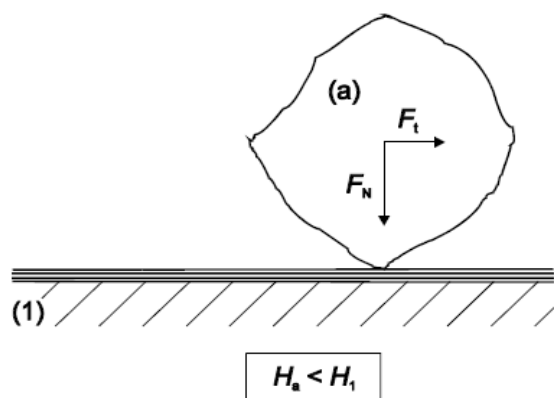


Slika 20. Selektivna abrazija [4]

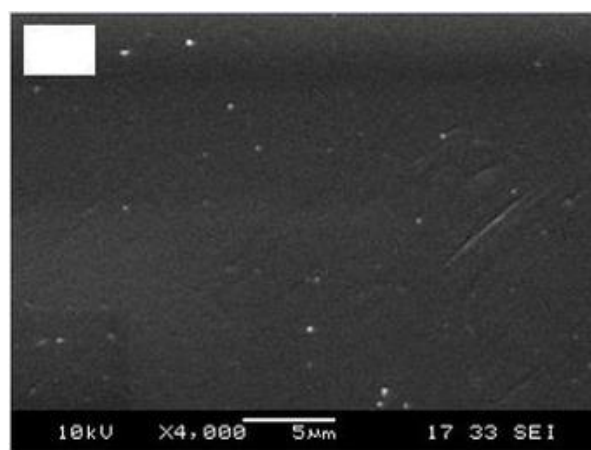


Slika 21. Izgled površine – selektivna [5]

“Nulta” abrazija nastaje kad je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice (koje potječu od vanjskog graničnog sloja). Ovaj tip abrazije najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenim različitim postupcima oplemenjivanja površine (PVD, CVD, boriranje, itd.)



Slika 22. “Nulta” abrazija [4]



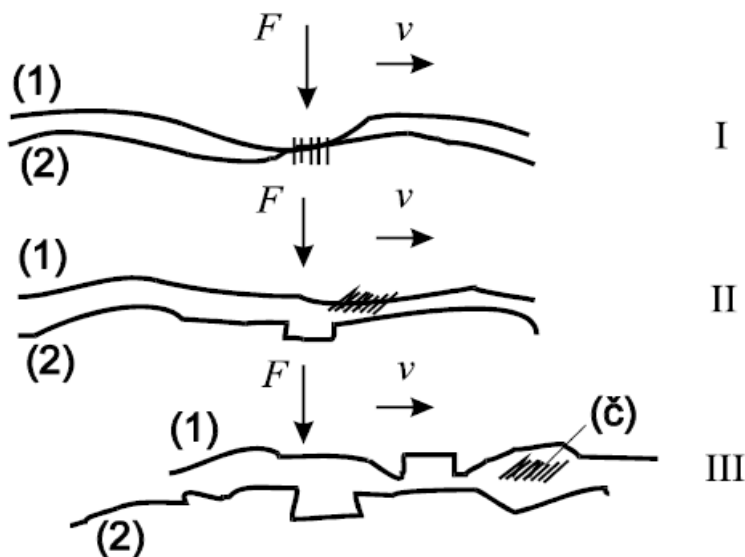
Slika 23. Izgled površine – “nulta” [5]

### Otpornost na abraziju

Otpornost na abraziju povezana je s međusobnim odnosom tvrdoće abraziva i materijala trošene podloge odnosno njegovih strukturnih konstituenata. Upravo je taj odnos odlučujući za prvu fazu jediničnog događaja abrazije tj. prodiranje koje je preduvjet za nastajanje početne pukotine, čijim napredovanjem će nastati čestica trošenja. Za postignuće selektivne ili čak nulte abrazije (koje se nastoji postići u praksi jer daje manje iznose abrazijskog trošenja nego čista abrazija) odlučujuća je tvrdoća strukturnih konstituenata ili površinskih slojeva, koja se mjeri s opterećenjima manjim od 10 N i naziva mikrotvrdoća.

#### 3.2.2. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne tarne plohe na drugu pri elativnom gibanju, a zbog procesa zavarivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze.



Slika 24. Jedinični događaj adhezije [4]

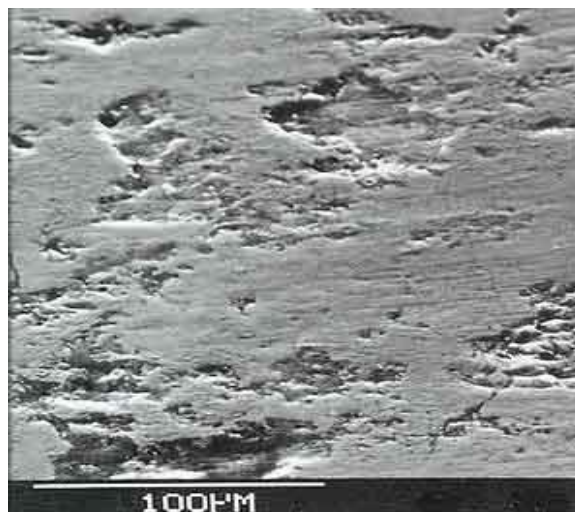
Faza I – Nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina

Faza II – Raskidanje adhezijskog spoja (čestica trošenja ostaje spontano “nalijepljena” na jednom članku kliznog para)

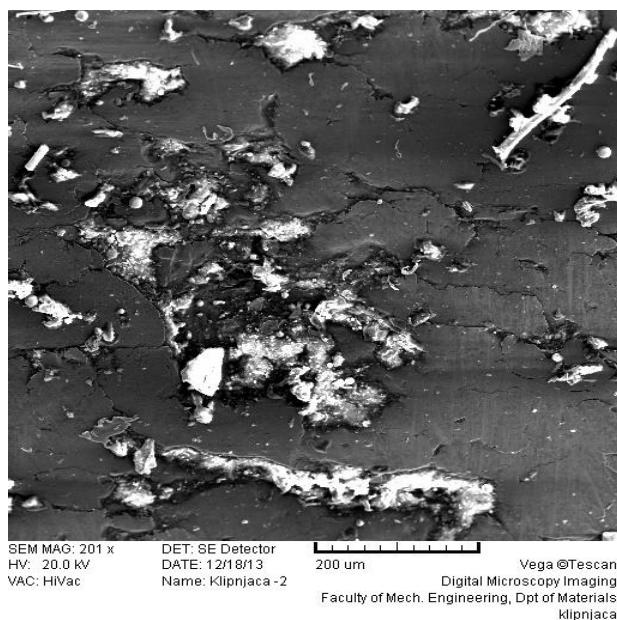
Faza III – Otkidanje čestice, oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima

Čestice iščupane s jedne površine ostaju privremeno ili trajno “nalijepljene” odnosno navarene na drugu tarnu površinu.

U nastavku su na slikama dani prikazi površine s koje su iščupane čestice i površine na koju su čestice spontano navarene, a oblik čestica trošenja ovisi o uvjetima, ali je uglavnom listićast.



Slika 25. Površina s koje su adhezijom iščupane čestice [6]



Slika 26. Izgled površine na koju su adhezijom čestice spontano navarene

### Otpornost na adhezijsko trošenje

Budući da se mikrozavareni spojevi uspostavljaju u prvoj fazi adhezijskog mehanizma, sklonost stvaranju tih spojeva i jakost uspostavljenih adhezijskih veza određivat će otpornost na

adhezijsko trošenje (uvijek za tarni par, ne za pojedinačni materijal). Materijali koji nisu skloni mikrozavarivanju u međusobnom dodiru su tribološki kompatibilni tj. prikladni za rad u paru. Stoga je osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara njihova tribološka kompatibilnost tj. prikladnost za rad u kliznom paru. Tribološka kompatibilnost pojedinih kombinacija materijala prikazana je Rabinowitz-ovom kartom tribološke kompatibilnosti.

	W	Mo	Cr	Co	Ni	Fe	Nb	Pt	Zr	Ti	Cu	Au	Ag	Al	Zn	Mg	Cd	Sn	Pb
In				2	2				1	2	2	1	1	4	2	1	1	1	1
Pb	3	3	4	4	4	4	4	1	1	1	4	3	2	4	4	2	2	1	
Sn	2		4	2	2	3	2	1	2	1	2	1	1	3	2	3	1		
Cd			2	2	3	3		1	1	2	2	1	1	4	1	1			
Mg		2		2	3	3	3		1	3	1	1	1	1	2				
Zn		2	1	1	1	1	3	1	3	2	1	1	1	1					
Al	1	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1						
Ag	4	3	4	4	4	4	3	1	2	1	2	1							
Au	1	2	1	2	1	1		1	1	2	1								
Cu	3	4	4	1	1	2	3	1	1	2									
Ti	1	1	1	2	1	1	1	1	1										
Zr	2	1	2	1	2	3	1	2											
Pt	1	1	1	1	1	1	1												
Nb	1	1	1	1	1	1													
Fe	1	1	1	1	1														
Ni	1	1	1	1															
Co	1	1	1																
Cr	1	1																	
Mo	1																		

4 - Dvije tekuće faze, rastvorljivost u krutom stanju manja od 0,1 %

3 - Dvije tekuće faze, rastvorljivost u krutom stanju veća od 0,1 %, ili jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju manja od 0,1 %

2 - Jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju između 0,1 i 1 %

1 - Jedna tekuća faza, rastvorljivost u krutom stanju preko 1 %

☐ - Nema podataka

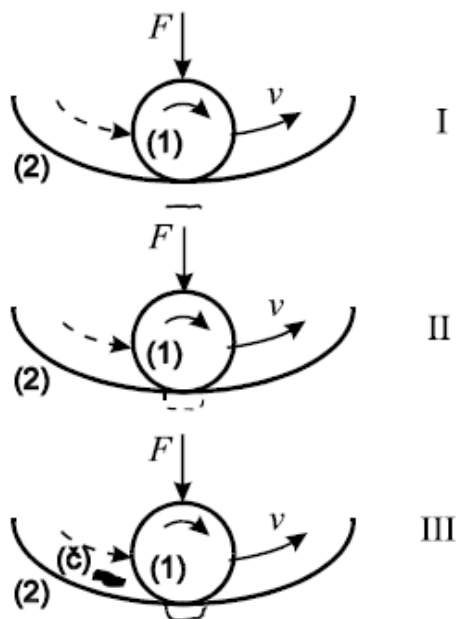
Kompatibilnost		Adhezija
najbolja	4	najslabija
dobra	3	slaba
loša	2	jaka
najlošija	1	najjača

Slika 27. Rabinowitz-ova karta tribološke kompatibilnosti [4]

Na tribološku kompatibilnost povoljno utječe i smanjenje broja kliznih sustava. Za realni tarni par tribološka kompatibilnost se može utvrditi samo pokusima ili procijeniti na osnovi zabilježenih rezultata ispitivanja.

### 3.2.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja. Jedinični događaj umora površine prikazan je s tri faze.



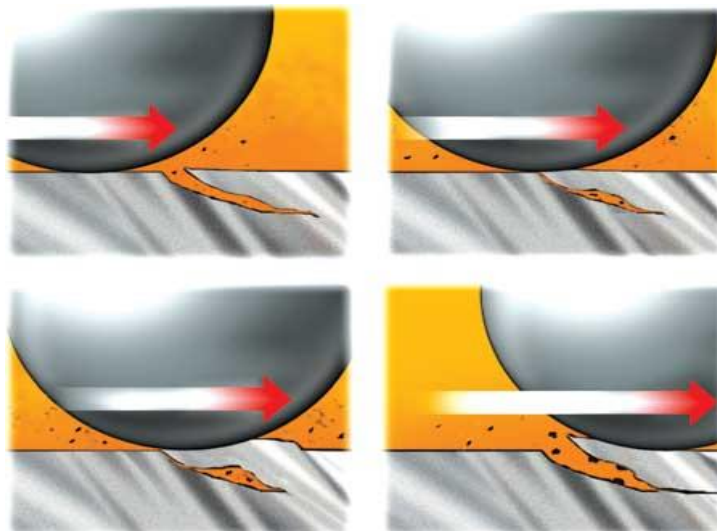
Slika 28. Jedinični događaj umora površine [4]

Faza I – Stvaranje mikropukotine (ispod površine)

Faza II – Napredovanje mikropukotine

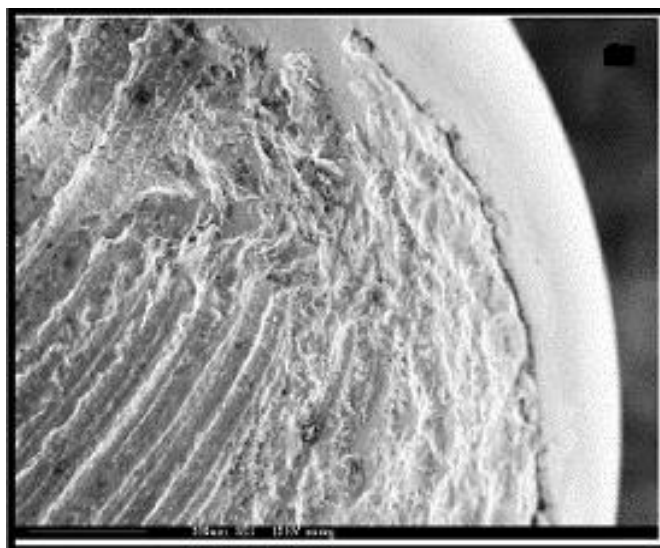
Faza III – Ispadanje čestice trošenja

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprezanje kod koncentriranog dodira (Hertzovo naprezanje) uvijek ispod same površine. Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica. U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od tog trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice. Ove kuglaste čestice su toliko sitne da se ne mogu registrirati kao gubitak mase, ali mogu poslužiti kao važan pokazatelj stanja procesa trošenja umorom površine.



Slika 29. Nastajanje kuglastih čestica u pukotini od umora [7]

U trećoj fazi jediničnog događaja umora dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenja oblika rupice, zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje).



Slika 30. Izgled površine oštećene umorom [8]





Slika 31. Kuglasta čestica trošenja nastala umorom površine [9]

#### Otpornost na umor površine

Otpornost na umor površine naziva se dinamička izdržljivost površine, a utvrđuje se pokusima.

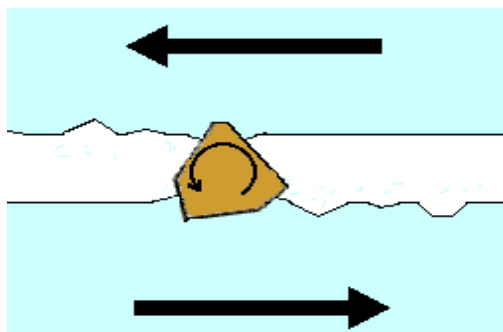
Mehanizmi nastajanja prvih pukotina kod umora površine su [1]:

- a) Gomilanje dislokacija na granicama zrna
- b) Međudjelovanje dviju kliznih ravnina
- c) Nastajanje pukotina na malokutnim granicama

Stvaranje početnih pukotina kod umora površine povezano je s procesom gibanja dislokacija, otpornost materijala na umor površine ovisit će o otporu gibanja dislokacija, a na to pak utječe velik broj čimbenika: podpovršinski koncentratori naprezanja, površinska obilježja, površinske pogreške, diskontinuiteti u geometriji dodira, raspodjela opterećenja u ležaju, elastohidrodinamika, tangencijalne sile, itd.

#### **3.2.4.Erozijsko trošenje**

Ova vrsta trošenja nastaje uslijed djelovanja djelića fluida (sa ili bez krutih čestica nošenih fluidom) koji velikim brzinama udaraju o površinu tijela.



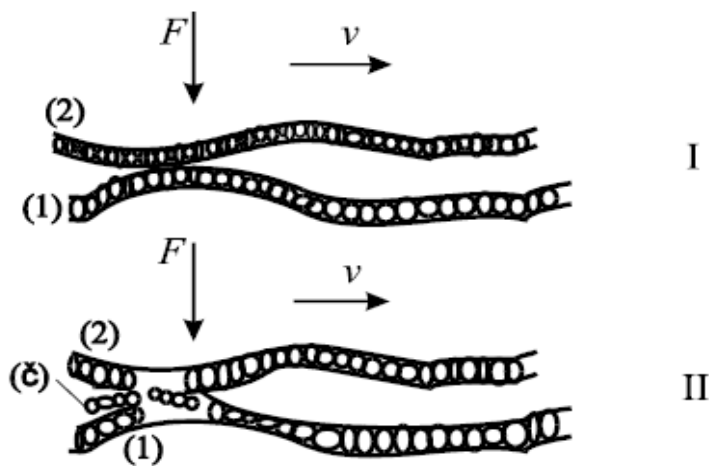
Slika 32. Erozijska [10]

Jačina erozije najvećim dijelom ovisi o brzini i kutu udara čestica, te njihovoj tvrdoći. Postoje dva osnovna oblika erozije:

- a) Udarna erozija (erozija oštrog kuta) proces koji slični abraziji i rezanju. Kako bi se smanjila količina trošenja, potrebna je velika tvrdoća same površine.
- b) Abrazivna erozija (erozija tupog kuta) gdje se većina energije troši na deformaciju površine. Zaštita od ove vrste trošenja zahtijeva elastični zaštitni sloj, najčešće elastomer.

### 3.2.5. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Jedinični događaj tribokorozije prikazan je u dvije faze.



Slika 33. Jedinični događaj tribokorozije [4]

Faza I – Stvaranje sloja produkata korozije

Faza II – Mjestimično razaranje sloja produkata korozije

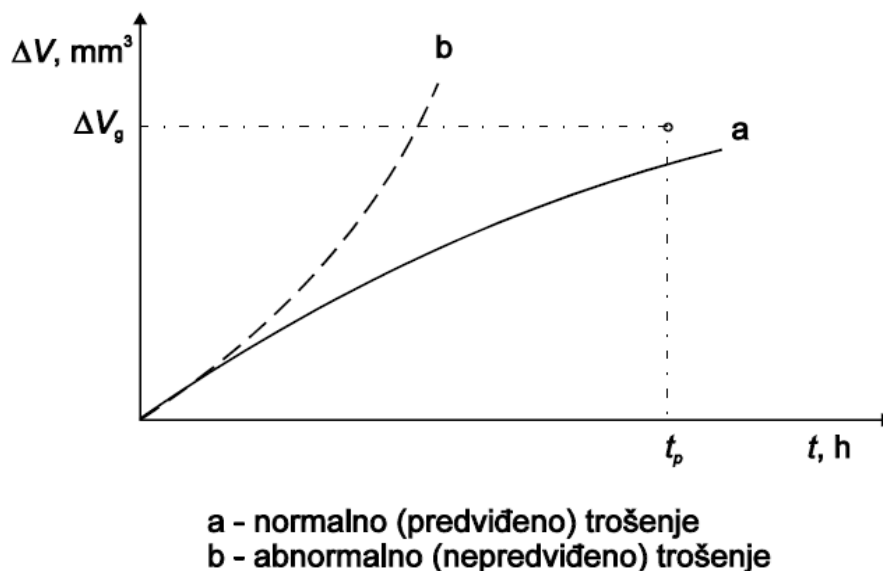
Izgled površina izloženih tribokoroziji ovisi o intenzivnosti odnošenja stvorenih čestica trošenja. Pri maloj intenzivnosti na površini se pojavljuju proizvodi korozije, a kod veće intenzivnosti odnošenja površina je naizgled polirana. Čestice trošenja su praškastog oblika uglavnom oksidne. Čestice trošenja kod tribokorozije se stvaraju unutar vanjskog površinskog sloja. Budući da se radi o vrlo tankim slojevima, tribokorozija je redovito slabo intenzivan mehanizam trošenja. Iako se tribokorozija ubraja u osnovne mehanizme trošenja ona je ipak kombinacija između kemijskih reakcija na površini triboelementa i jednog od prethodno opisanih osnovnih mehanizama trošenja tj. abrazije, adhezije ili umora površine.

### Otpornost na tribokoroziju

Osnovni kriterij za otpornost materijala na tribokoroziju je kemijska postojanost materijala u određenom mediju. Treba također reći da slojevi proizvoda korozije zaštićuju metalne površine od neposrednog dodira metal/metal pa se često i namjerno izazivaju u svrhu zaštite. Dakle tribokorozija može biti “poželjan” mehanizam trošenja jer bi drugi mehanizmi trošenja u istoj situaciji izazvali mnogo intenzivnije trošenje. No pojedini oblici tribokorozije mogu biti vrlo opasni, npr. u sprezi s vibracijama, visokim temperaturama ili vlažnim okolišem. Posebno je ozbiljan problem tribokorozije u kapljevitom kisiku ili u kapljevitom fluoru.

#### 3.2.6. Djelovanje mehanizama trošenja

Svaki proces trošenja sastoji se od najmanje dva mehanizma trošenja ili više njih, koji djeluju istodobno ili u vremenskom slijedu, ovisno o vrsti tribosustava, relativnom gibanju i radnim uvjetima. Stupanj opasnosti od pojedinih mehanizama različit je za različite tribosustave, a zadaća je tribologije izbjeći pojavu opasnijih mehanizama trošenja ili ju pak odgoditi. Dakle treba postići da određeni tribosustav funkcionira pretežno u režimu tzv. normalnog trošenja.



Slika 34. Opći oblik procesa trošenja [4]

Proces trošenja može se pratiti preko neke od mjerljivih veličina tribosustava. Najčešće se to radi praćenjem sile trenja, buke i vibracija, temperature, spektografskom analizom ulja, magnetnim detektorima čestica, radioaktivnim metodama, ferografijom, itd.

### **3.2.7. Tribološke mjere**

To su postupci i metode koji imaju za cilj postizanje prihvatljivih vrijednosti trenja i trošenja u realnim tribosustavima. Osim konstrukcijskih mjera, kojima je svrha izbjegavanje ili smanjenje utjecaja uzroka trošenja, glavne tribološke mjere su [1]:

- a) Izbor materijala triboelemenata
- b) Zaštita površina od trošenja
- c) Uhodavanje
- d) Podmazivanje

Odabir gore navedenih stavki ključan je pri sprječavanju i smanjenju djelovanja nepoželjnog trošenja. Budući da se ovaj rad bavi problemom trošenja klipnjače koljenastog vratila dvotaktnog motora, u nastavku će ukratko biti opisan princip rada navedenog motora in neke njegove karakteristike.

#### **4. MOTOR**

Motor je naprava koja služi za pretvaranje određenih vrsta energije u mehaničku energiju gibanja. Tako je motor naprava koja pretvara [11]:

- a) kemijsku energiju goriva u toplinsku energiju, a toplinsku energiju (energiju izgaranja) u energiju gibanja
- b) električnu energiju u kretanje (elektromotor), a njegova suprotnost je generator koji pretvara kinetičku energiju u električnu

Podjela kod motora s unutarnjim izgaranjem može se napraviti na više načina [11].

Prema taknosti:

- a) Dvotaktni
- b) Četverotaktni

Prema srednjoj stapnoj brzini ili hodnosti:

- a) Sporohodne
- b) Srednjehodne
- c) Brzohodne

Prema broju okretaja:

- a) Sporokretne
- b) Srednjekretne
- c) Brzokretne

Prema vrsti procesa:

- a) Otto
- b) Diesel

Prema konstrukciji:

- |                 |                  |
|-----------------|------------------|
| a) Redni motori | d) Bokser motori |
| b) V-motori     | e) Wankel motori |
| c) VR-motori    |                  |

#### **4.1. Princip rada dvotaktnog motora**

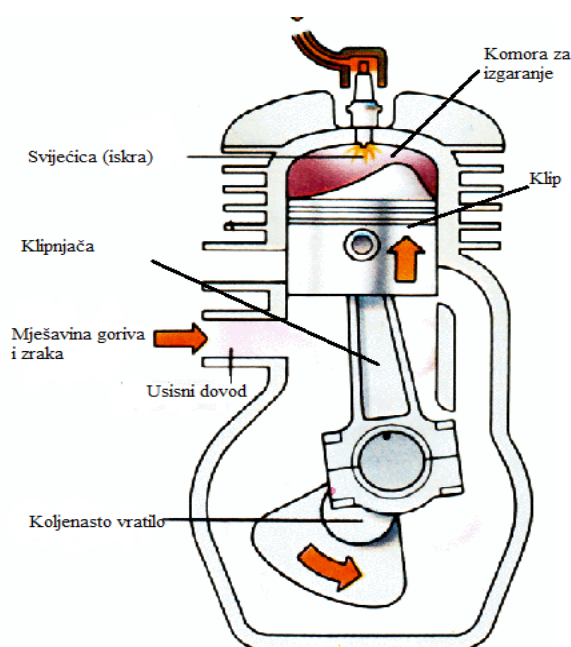
Dvotaktni motor je motor s unutrašnjim izgaranjem koji cijeli svoj radni ciklus obavi u dva takta ili jedan krug koljenastog vratila. Dvotaktni motor može biti Otto ili Diesel, gdje nailazimo na dva termodinamički različita procesa.

Kod Diesel motora prvi takt sastoji se od usisa i komprimiranja zraka, dok drugi radni takt sadrži ekspanziju i ispuh. Kretanjem klipa iz donje mrtve točke započinje radni takt. Na donjem dijelu košuljice cilindra nalaze se usisni kanali za usisavanje svježeg zraka. Prolaskom klipa iznad usisnih kanala prestaje dotok svježeg zraka i počinje komprimiranje zraka. Klip se kreće ka gornjoj mrtvoj točki. Kada klip stigne u tu točku započinje radni takt. No ubrizgavanje goriva započinje nekoliko stupnjeva prije gornje mrtve točke. Ubrizgavanjem goriva u prostoru cilindra ono se samozapaljuje zbog visoke temperature komprimiranog zraka i fino raspršenih čestica goriva. Gorivo se ubrizgava pod tlakom od oko 150 bara. Nakon ekspanzije klip kreće prema donjoj mrtvoj točki i okreće koljenasto vratilo na koje je spojen preko križne glave i ojnice. Ispuh počinje kada klip svojim gibanjem prema donjoj mrtvoj točki otvori ispušne kanale na košuljici cilindra (smješteni iznad usisnih kanala tako da većina izgorjene smjese izađe izvan prostora cilindra). Dolaskom klipa u donju mrtvu točku završava radni takt i započinje prvi.

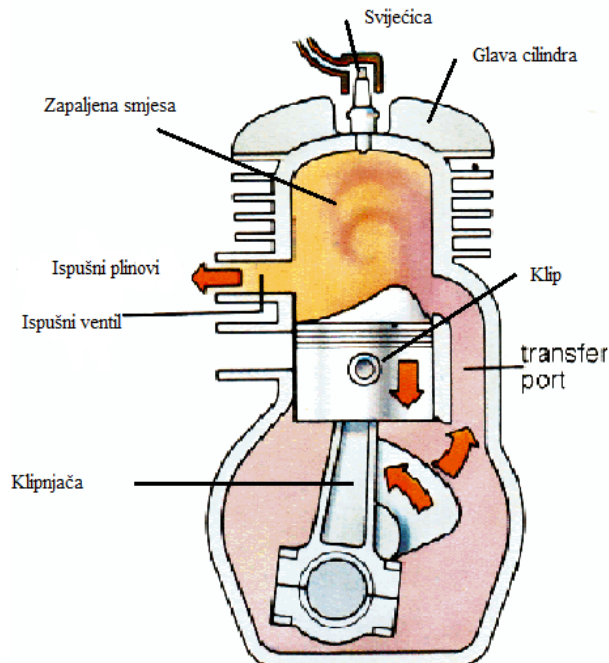
Za benzinske dvotaktne motore postoji par razlika, u cilindar se ubacuje smjesa zraka i goriva, koja se tlači i nekoliko stupnjeva prije gornje mrtve točke zapaljuje iskrom iz svijećice [11].



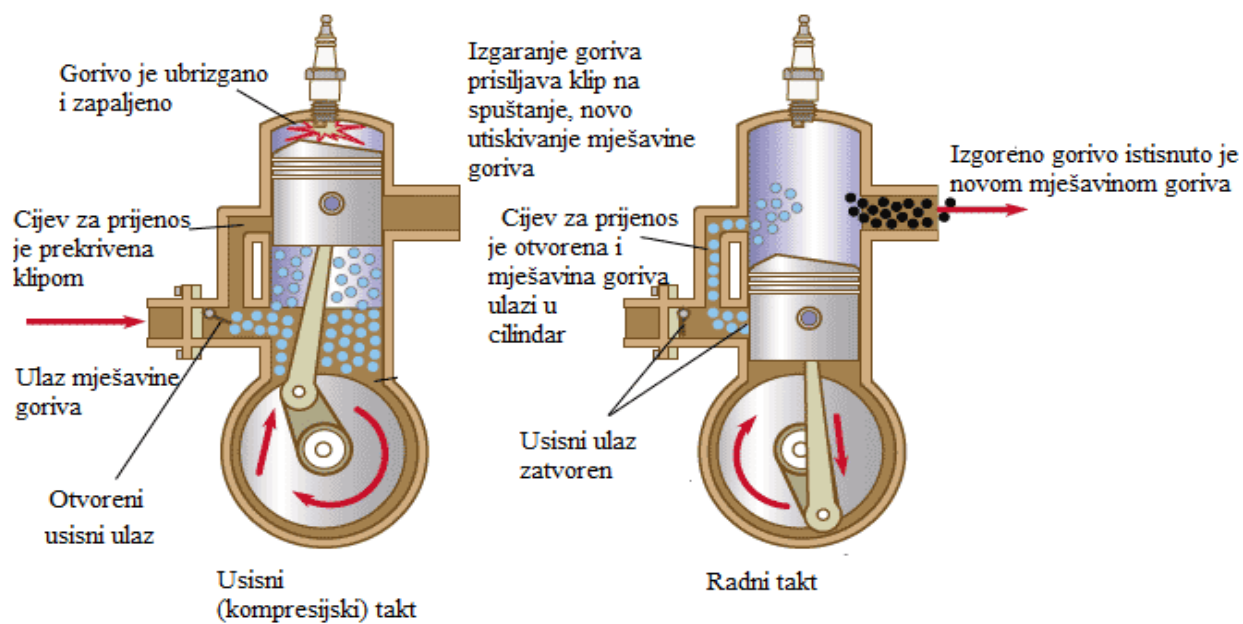
Slika 35. Dvotaktni motor (benzinski) [12]



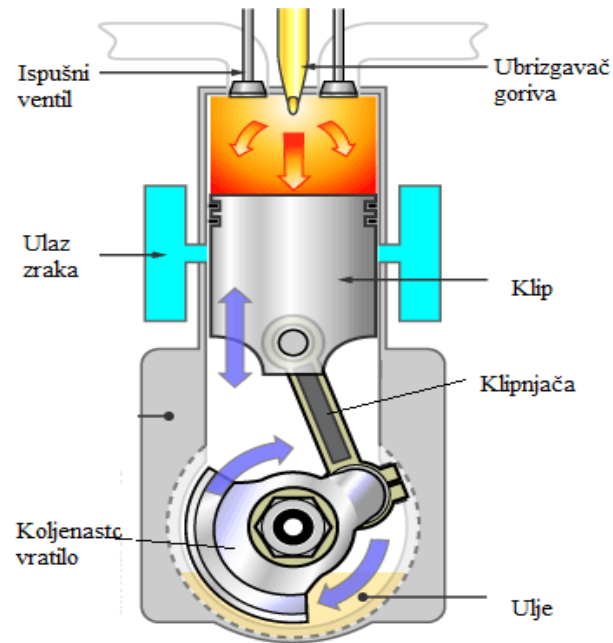
Slika 36. Usisni takt [13]



Slika 37. Radni takt [13]



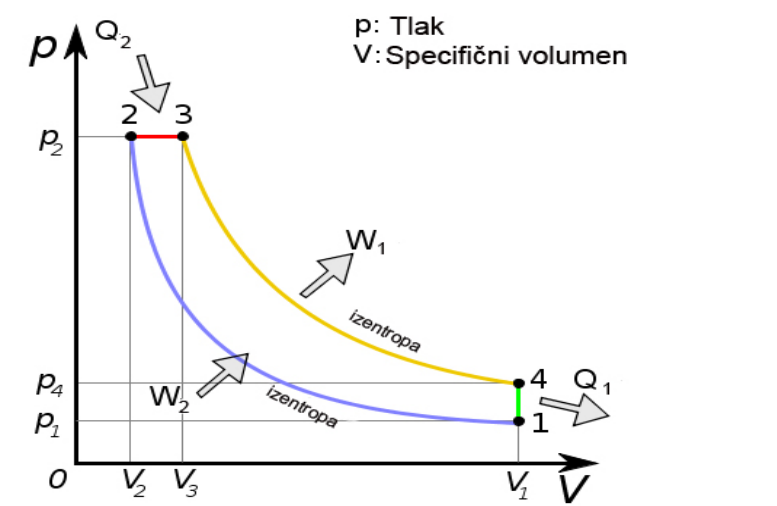
Slika 38. Radni ciklus dvotaktnog motora (benzinski) [14]



Slika 39. Dvotaktni (Diesel) motor [15]

#### 4.2. Diesellov proces

Dieselov proces je termodinamički proces koji prati tlak i volumen izgarajuće komore u Diesel motoru. Pretpostavlja se da je tlak konstantan u prvom dijelu izgaračke faze (2-3). To je većinom samo teoretski moguće, realni Dieselovi procesi imaju povećanje tlaka u ovoj fazi, ali manje nego u Ottovom procesu.



Slika 40. Teoretski dijagram idealiziranog Diesellovog procesa [16]



Slika 38. prikazuje p,v dijagram idealiziranog Diesellovog procesa (gdje je p - tlak, a v - specifični volumen). Dalje se može uočiti:

- Proces 1-2 je izentropska kompresija
- Proces 2-3 je povrativo izobarno grijanje
- Proces 3-4 je izentropska ekspanzija
- Proces 4-1 je povrativo izohorno hlađenje

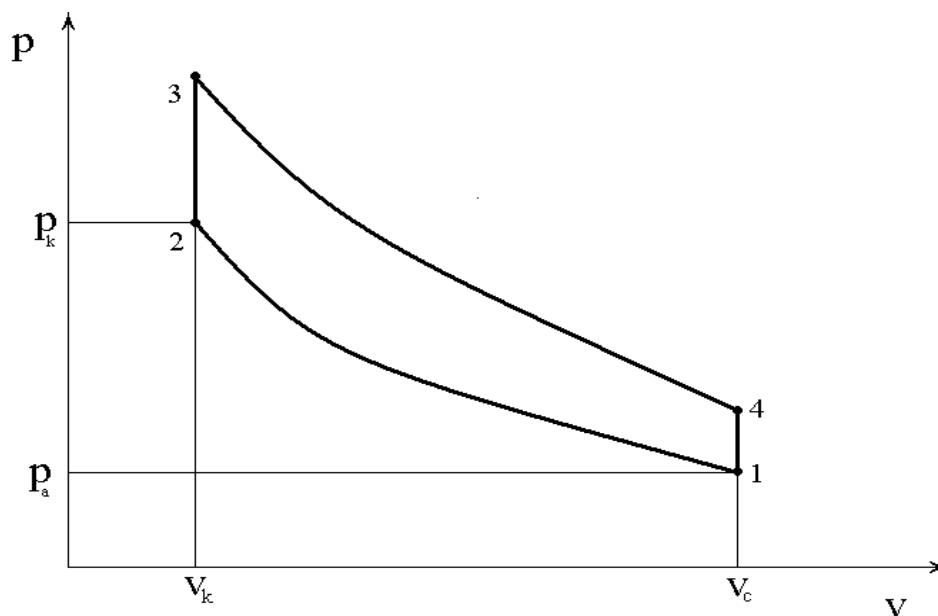
$W_2$  je rad klipa koji komprimira radnu tvar, a  $W_1$  je rad dobiven ekspanzijom radne tvari.  $Q_2$  je toplina dobivena izgaranjem goriva, dok je  $Q_1$  odvedena toplina ulaskom zraka.

Stoga taktove možemo podijeliti:

1. Takt – Izmjena medija i kompresija (od točke 4 do točke 2)
2. Takt – Izgaranje i ekspanzija (radni takt) (od točke 2 do točke 4)

Za razliku od Diesellovog procesa, Ottov proces više nema od točke 2-3 povrativo izobarno grijanje, već izohorno hlađenje.

### 3.3. Ottov proces



Slika 41. Teoretski dijagram dvotaktnog Otto procesa [16]

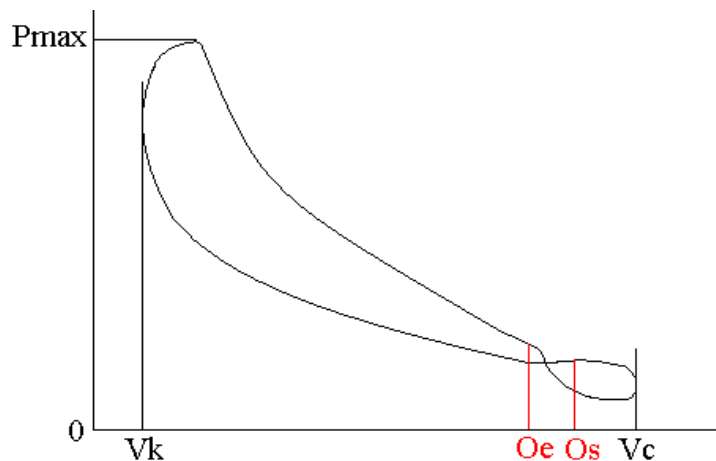
Stoga na dijagramima točke predstavljaju:

- 1 – Kraj ispuha i usisa, početak kompresije
- 2 – Kraj kompresije, ubrizgavanje goriva, početak izgaranja

3 – Kraj izgaranja, početak ekspanzije

4 – Kraj ekspanzije, početak izmjene medija u cilindru

#### Stvarni dijagram dvotaktnog motora



Slika 42. Stvarni dijagram dvotaktnog motora [17]

$V_k$  – zapremina kompresije (volumen iznad čela stapa kada je stap u gornjoj mrtvoj točki)

$V_c$  – zapremina cilindra (volumen iznad čela stapa kada je stap u donjoj mrtvoj točki)

$O_e$  – točka kada se otvaraju ispušni kanali

$O_s$  – točka kada se otvaraju usisni kanali

Na induciranom dijagramu, od trenutka zatvaranja kanala klipom  $O_e$  počinje kompresija, koja traje do trenutka početka izgaranja, nešto prije gornje mrtve točke (trenutak naglog porasta tlaka u cilindru). Tlak raste do najvećeg, te se tijekom izgaranja tlak zadržava blizu maksimalnog. Kraj izgaranja obilježava nagli pad tlaka (ekspanzija u cilindru). U trenutku otvaranja ispušnih kanala tlak počinje naglo padati. U trenutku  $O_s$  se otvaraju usisni kanali i zrak ulazi u cilindar, smanjujući donekle podtlak koji u njemu vlada. Zaustavljanjem gibanja klipa dolazi do porasta tlaka u cilindru, koji raste na tlak ispirnog zraka. Gibanjem klipa od donje mrtve točke tlak još malo raste, no ta je razlika mala do trenutka početka kompresije.

#### **4.4. Bitne karakteristike**

Kroz slike i dijagrame Diesel i benzinskog dvotaktnog motora, može se zaključiti da je najveća razlika u tome što kod Diesel motora samo zrak ulazi u cilindar, a kod benzinskog motora mješavina zraka i goriva. Stoga je Diesel dvotaktni motor ekološki prihvatljiviji, a i za dvotaktnu izvedbu mnogo pogodniji jer se samo zrak komprimira i nakon toga se gorivo ubrizgava direktno

u komprimirani zrak. No Diesel dvotaktni motor obično ima kompresor zato ga nikad nećemo naći npr. na motornoj pili jer bi to jednostavno bilo preskupo.

Najčešću primjenu benzinski dvotaktni motori pronalaze u motociklima, ali i kod nekih starijih modela automobila kao npr. Wartburg ili Trabant (upravo u slučaju ovog rada gdje je ispitano trošenje klipnjače koljenastog vratila dvotaktnog motora uzetog iz jednog modela Wartburga).

Dvotaktni motor svoj radni ciklus obavlja za dva takta tj. jedan okretaj koljenastog vratila, što znači da dvotaktni motor pri istom broju okretaja koljenastog vratila kao četverotaktni, ima dva puta više radnih taktova (tj. dvotaktni motor ima potpunije iskorištenje radnog ciklusa). Radni ciklus dvotaktnog motora sastoji se od istih procesa kao i radni ciklus četverotaktnog motora, s tim što se u pojedinim dijelovima ciklusa dvotaktnog motora izvodi više procesa nego kod četverotaktnog i ti se procesi preklapaju. Pri jednakim dimenzijama cilindra i pri jednakom broju okretaja snaga dvotaktnog motora bi teorijski trebala biti dva puta veća zbog duplo većeg broja radnih taktova u jedinici vremena. U stvarnosti snaga dvotaktnih motora je veća za 1.5 do 1.7 puta, uslijed gubitka dijela zapremine, lošije kvalitete izmjene radne materije, trošenja dijela snage na pogon pomoćnih agregata i sl. Izmjena radne materije kod dvotaktnih motora se izvodi pri znatno manjoj promjeni kuta okretanja koljenastog vratila (za znatno kraće vrijeme), što utječe na savršenost tog procesa, a time i čitavog radnog ciklusa. Zbog toga što se u procesu izmjene radne materije kod dvotaktnih motora gubi dio svježeg punjenja, oni se najčešće izvode u Diesel varijanti. Izuzetak čine manji motori kod kojih veći značaj ima jednostavna konstrukcija i potreba za postizanje što veće snage, nego potrošnja goriva (npr. motocikli, poljoprivredna mehanizacija, čamci, itd.).

U današnjem automobilizmu i motociklizmu dvotaktni motori se više ne upotrebljavaju zbog sve strožih zahtjeva na ekologiju (emisija ispušnih plinova) koji se s dvotaktnim motorom ne mogu ispuniti. Visoka učestalost radnih ciklusa dvotaktnih motora (u odnosu na četverotaktne) daje ravnomjerniji okretni moment, ali dovodi do povećanog zagrijavanja elementa i mehanizma motora, čime se ugrožava podmazivanje, povećava habanje, smanjuju mehaničke karakteristike materijala, a time i skraćuje radni vijek dvotaktnih motora. Stoga se zaključno može reći da su danas četverotaktni motori prvi izbor za većinu namjena i polako istiskuju dvotaktne motore iz upotrebe. No za pokretanje brodova, lokomotiva, industrijskih generatora i danas se koriste dvotaktni Diesel motori. Upravo je brodski pogon jedino područje gdje dominiraju dvotaktni motori.

## **5.EKSPERIMENTALNI DIO**

Kao što je već navedeno, tema ovog rada je trošenje klipnjače koljenastog vratila dvotaktnog motora sa vanjskim paljenjem i u dosadašnjim naslovima opisani su neki od glavnih mehanizama trošenja, te princip rada dvotaktnog motora. Eksperimentalni dio obavljao se na klipnjači uzetoj iz jednog modela Wartburga (marka automobila porijeklom iz Istočne Njemačke).



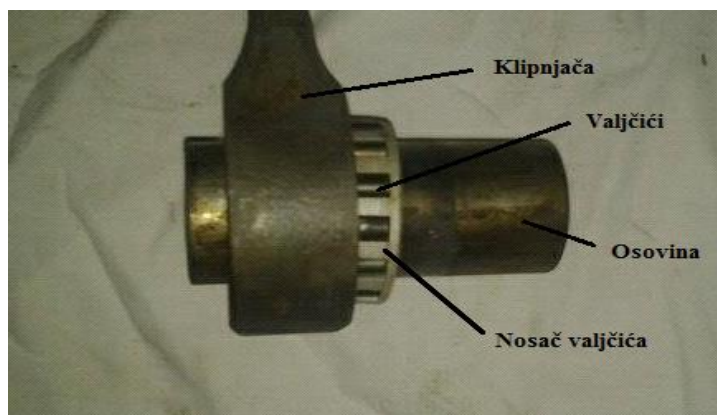
Slika 43. Wartburg [18]

Klipnjača je dio motora koji spaja klip i koljenasto vratilo (radilicu), te zajedno sa njim čini jednostavan mehanizam koji pretvara naizmjenično gibanje u rotacijsko.



Slika 44. Klipnjača i koljenasto vratilo [19]

Klipnjača uzeta iz ovog automobila (dvotaktni motor sa vanjskim paljenjem) poslužila je za istraživanje mehanizama trošenja jer je u konkretnom primjeru došlo do problema u radu motora. Problem se manifestirao kroz čudne zvukove, lupanje i udaranje pri radu motora. Također na klipnjači su vidljivi tragovi zaribavanja. Kako bi se utvrdilo o čemu se točno radi, motor je rastavljen. Utvrđeno je da je navedeni problem nastao na spoju klipnjače i osovine (ležaj, podloška).



Slika 45. Spoj klipnjače i osovine

Najvjerojatnije zbog lošeg podmazivanja, došlo je do brzog trošenja ležajeva, a time i do nepravilnosti u radu motora. Kako bi se utvrdilo koji su mehanizmi trošenja nastupili pripremljeni uzorci (izrezani od navedenih dijelova) analizirani su elektronskim mikroskopom, a kako bi točno znali od kojih materijala su načinjeni navedeni dijelovi, provedeno je također i ispitivanje kemijskog sastava.



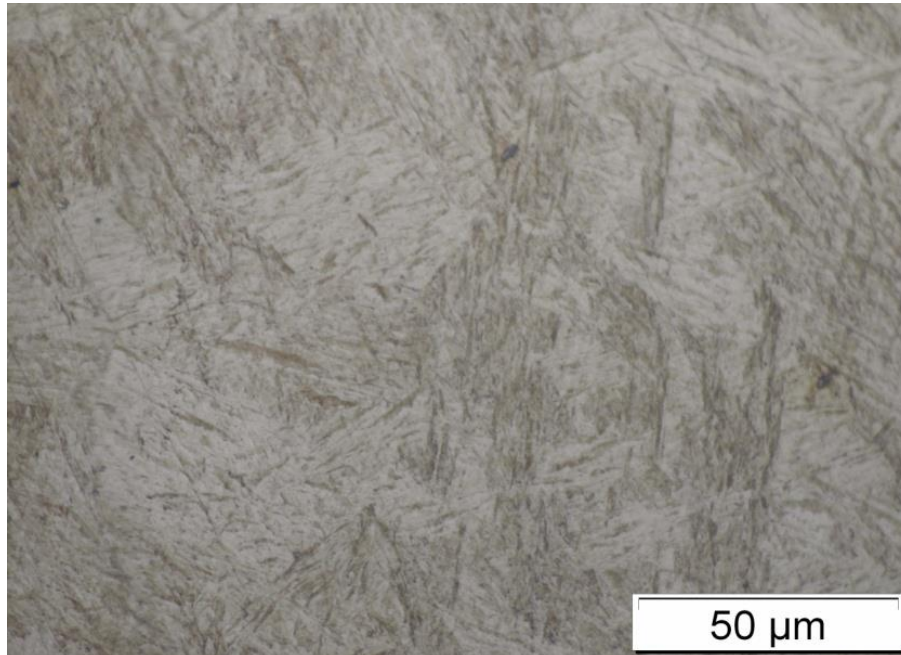
Slika 46. Klipnjača izrezana na dijelove

### **5.1. Kemijski sastav i mikrostruktura**

U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza dostavljenih uzoraka. Metodom optičke emisijske spektrometrije, dobiveni su sljedeći rezultati:

Tablica 1. Kemijski sastav analiziranog dijela

oznaka uzorka	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
Klipnjača	0,20	0,22	0,72	0,017	0,016	0,29	0,07	0,49	0,20	ostatak



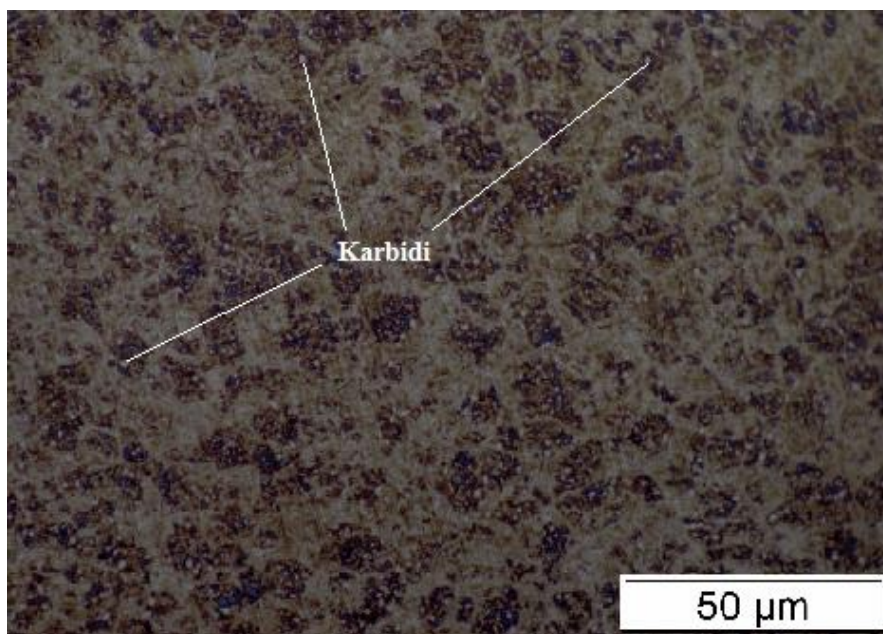
Slika 47. Mikrostruktura 16Mo5, nagriženo (povećanje 1000 puta)

Iz dobivenih informacija se daljnjom analizom podataka i fotografijom mikrostrukture (dobivene optičkim mikroskopom, model Olympus GX51) može zaključiti da materijal od kojeg je klipnjača izrađena pripada skupini konstrukcijskih čelika za rad pri povišenim i visokim temperaturama, bainitne mikrostrukture (popušteni bainit), konkretno se radi o čeliku 16Mo5 [20].

Budući da je klipnjača izložena velikim naizmjenično promjenjivim opterećenjima, uglavnom se izrađuje od legiranih čelika za poboljšavanje ili cementiranje (Cr, Ni, Mo). Kod automobilskih motora, klipnjače se danas često izrađuju lijevanjem od perlitnog sivog lijeva ili nodularnog lijeva. Prednost izlivenih klipnjača je niža cijena i bolja iskoristivost materijala pri izradi kompliciranog oblika. Kao materijal za lijevane klipnjače može se koristiti legura titana, sa vrlo velikom čvrstoćom, a malom specifičnom masom.

Drugi element tribopara su valjčići ležaja, za koje je analizom slike mikrostrukture i prema [20],[21] utvrđeno da su izrađeni od niskolegiranog krom alatnog čelika. Na slici je vidljivo da se u popuštenoj martenzitnoj matrici nalaze raspršeni karbidi (bijele točkice).





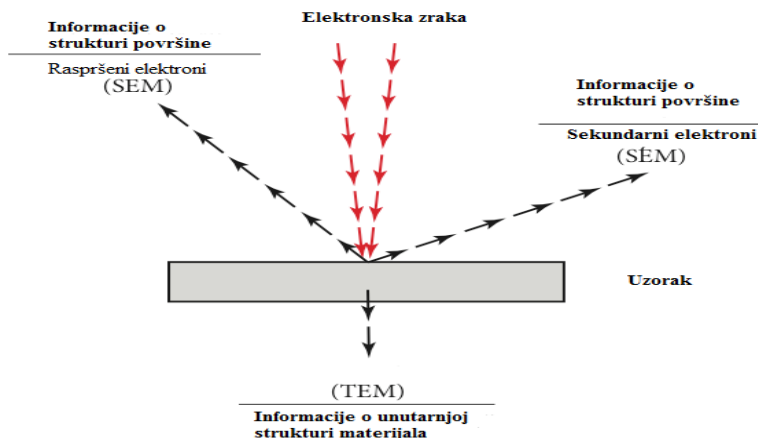
Slika 48. Mikrostruktura niskolegiranog krom alatnog čelika, nagriženo (povećanje 1000 puta)

## **5.2.Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) i EDS**

Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) jedna je od najčešće korištenih metoda u karakterizaciji površine materijala. SEM uređaji rade na povećanjima od 10 do preko 500 000, pa osim morfologije mogu poslužiti i za saznavanje informacija o kemijskom sastavu materijala blizu njegove površine. U standardnom SEM ispitivanju generira se snop primarnih elektrona fokusiran u spot promjera oko 5 nm, sa energijama elektrona koje variraju od 100 eV do 50 keV. U slučaju neelastičnog rasipanja primarni elektroni predaju dio svoje energije elektronima u materijalu, čime se stvaraju uvjeti za njihovu emisiju u vidu sekundarnih elektrona koji obično imaju energiju manju od 50 eV. Dio neelastično predate energije primarnih elektrona dovodi i do pobuđivanja elektrona iz elektronskih ljuski atoma, a tako pobuđeni atomi vraćaju se u osnovno stanje (snopom fotona X zračenja). Dio elastično rasutih primarnih elektrona vraća se iz materijala kroz površinu (sa vjerojatnošću proporcionalnoj atomskom broju) [22].

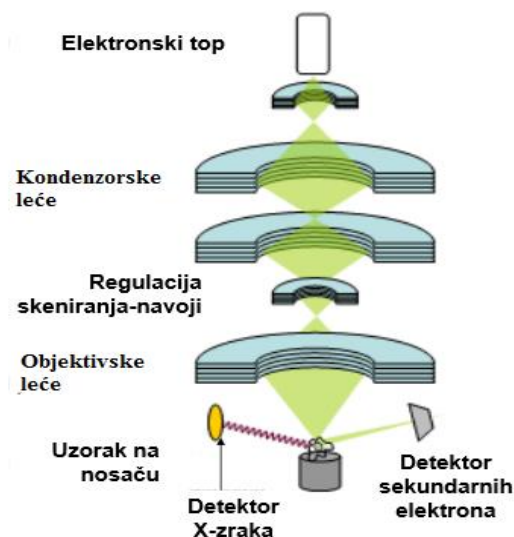
SEM sustav formira sliku detektiranjem svih spomenutih tipova zračenja koji se javljaju kao rezultat interakcije primarnog elektronskog snopa sa materijalom. Detektori sekundarnih elektrona su standardna oprema svih SEM-ova, a rijetko su prisutni detektori za sve signale.

Kod tipičnog SEM elektroni se uz pomoć toplinske emisije izbacuju iz elektronskog topa koji sadrži katodu od volframa. Volfram je pogodan jer je jeftin i ima najvišu točku topljenja od svih metala, te se može zagrijati tako da emitira elektrone.



Slika 49. Elektroni kod SEM-a [22]

Elektronska zraka energije 0.2 keV-40 keV se fokusira uz pomoć kondenzatora na spot promjera 0.4 -5 nm. Zraka prolazi kroz parove skenirajućih namotaja koji su obično u zadnjoj leći (otklanjaju zrake u x i y osi tako da mogu skenirati duž kvadratnog područja uzorka).



Slika 50. Princip rada SEM [22]

Skeniranje površine se ostvaruje prelaženjem uskog snopa primarnih elektrona preko površine uzorka. U svakoj točki uzorka u interakciji atoma primarnog snopa i atoma uzorka dolazi do stvaranja signala koji se detektira. Signal se mapira na ekranu, a svaka točka interakcije odgovara posebnoj slici na ekranu. Oštrina slike ovisi o jačini signala sa uzorka (energija sekundarnih elektrona). Upadni elektroni se vraćaju bilo kao primarno raspršeni prema natrag (backscattered electrons) ili kao sekundarno raspršeni koji se najviše koriste za istraživanje površine. Sekundarni elektroni su niskih energija tako da samo oni stvoreni nekoliko nanometara ispod površine uzorka mogu izaći i biti detektirani. Podatak prema natrag raspršenih elektrona ovisi o



rednom broju atoma, tako da to dodatno može poslužiti za kemijsku analizu. Najlakše se detektiraju sekundarni elektroni jer su vrlo brojni i malih energija.

Rade pod vakuumom  $10^{-2}$  do  $10^{-8}$  Pa. Razlučivanje i dubina prodiranja ovise o naponu, materijalu uzorka i veličini spota.

EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) je analitička metoda koja se koristi za analizu kemijskih elemenata prisutnih u nekom uzorku ili kemijsku karakterizaciju uzorka. Princip rada osniva se na činjenici da svaki element ima jedinstvenu atomsku strukturu koja daje jedinstvenu kombinaciju vrhova za njegov rendgenski spektar. Kako bi se potaknula emisija karakterističnih rendgenskih zraka iz uzorka, rendgenska zraka visoke energije se upućuje na uzorak.

SEM analiza uzorka obavljena je s Tescan Vega TS5136 modelom skenirajućeg elektronskog mikroskopa.

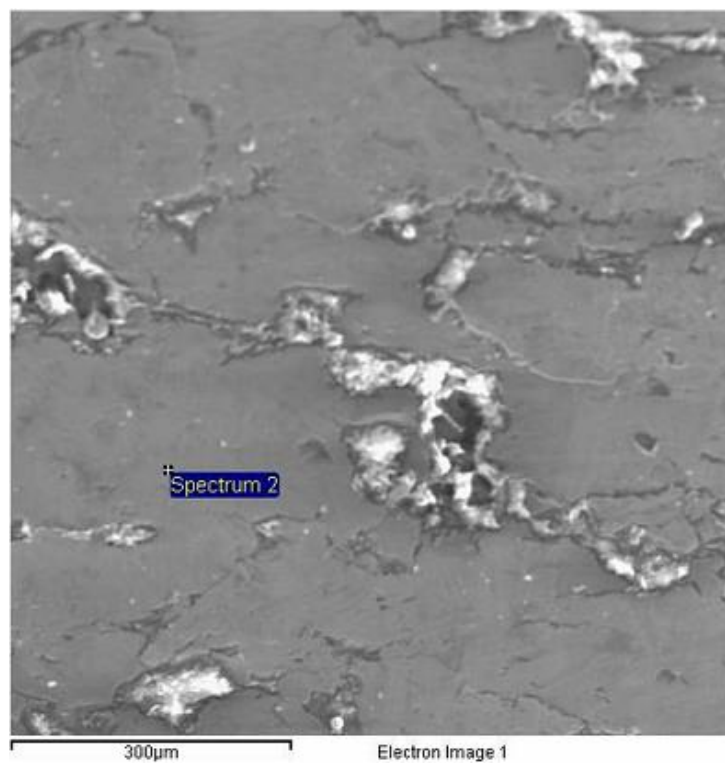


Slika 51. Tescan Vega TS5136 [23]

U nastavku su priložene fotografije dobivene tijekom SEM analize uzorka (klipnjača).



Slika 52. Dio klipnjače na kojem je obavljena SEM analiza

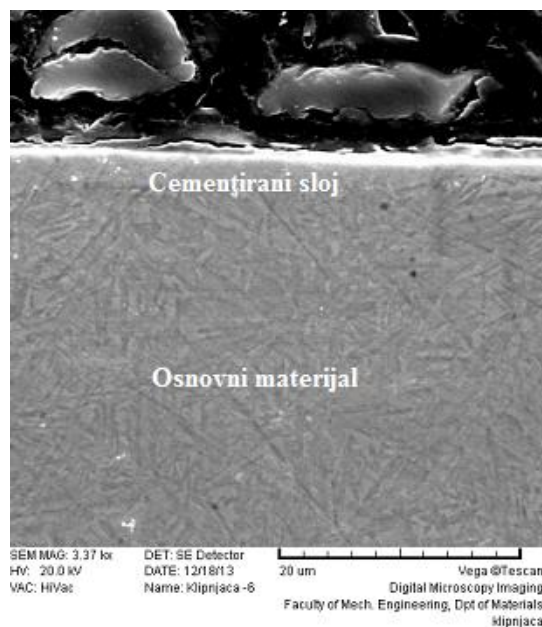


Slika 53. EDS analiza - osnovni materijal klipnjače

Tablica 2. Maseni i atomski udio pojedinog elementa u osnovnom materijalu

Element	Maseni %	Atomski %
C	12.09	38.85
Al	0.56	0.80
Mn	0.87	0.61
Fe	86.47	59.74
Ukupno	100.00	

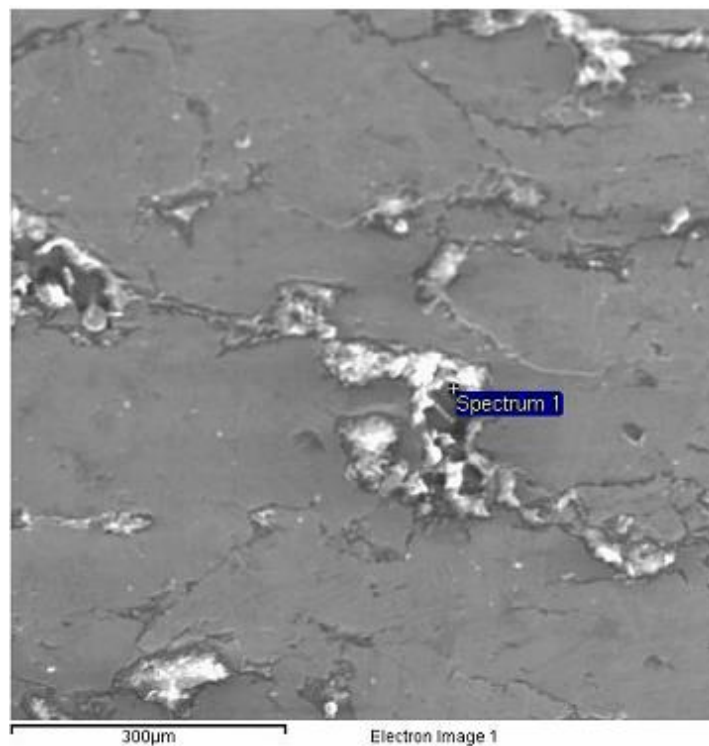
Cementiranje čelika je postupak toplinske obrade koji se sastoji od pougličanja, kaljenja i niskotemperaturnog popuštanja. Cilj je ostvarivanje tvrdoće na površinskim slojevima (otpornost na trošenje) i zadržavanje žilavosti u jezgri (otpornost na udarna opterećenja). Izvori ugljika mogu biti čvrsti, solne kupelji, plinovi, ionizirani plinovi itd.



Slika 54. Cementirani sloj klipnjače

Kao što je vidljivo s fotografije (Slika 56.), SEM analizom utvrđeno je postojanje cementiranog sloja na površini klipnjače.

U nastavku slijedi analiza na područjima trošenja na klipnjači.

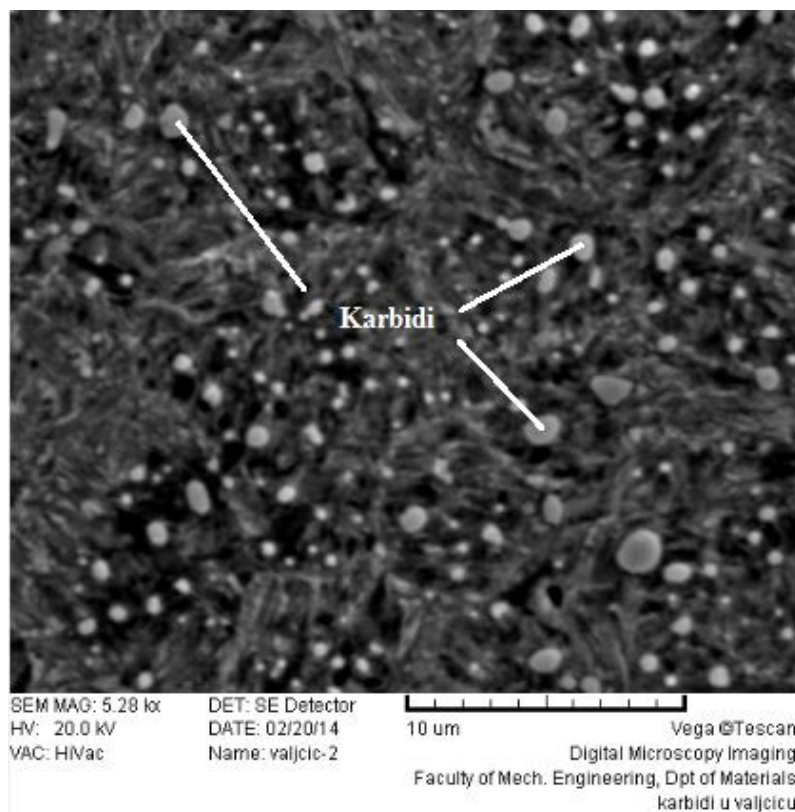


Slika 55. EDS analiza – područje gdje je došlo do trošenja

Tablica 3. Maseni i atomski udio pojedinog elementa na području trošenja

Element	Maseni%	Atomski %
C	35.52	64.79
O	9.22	12.63
Al	1.31	1.06
Si	0.37	0.29
S	0.69	0.47
Cr	0.39	0.17
Mn	0.42	0.17
Fe	52.09	20.43
Ukupno	100.00	

Na prethodnoj fotografiji (Slika 57.) i iz tablice udjela pojedinih elemenata na području trošenja (Tablica 3.) je vidljivo da su brežuljkaste nakupine na klipnjači zapravo čestice valjčića.



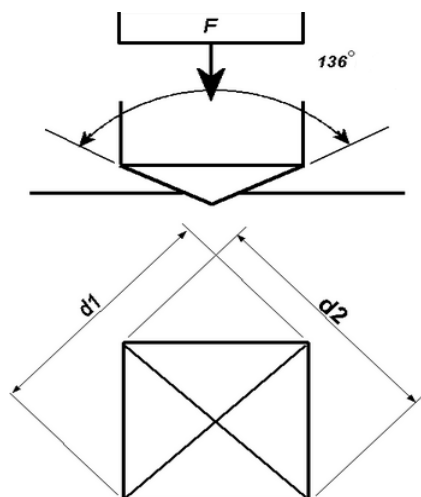
Slika 56. SEM analiza – mikrostruktura valjčića

Na slici 56. se jasno vidi i potvrđuje da se u popuštenoj matrici martenzita nalaze raspršene kuglice karbida, kao što je već prethodno navedeno kod slike mikrostrukture dobivene optičkim mikroskopom za materijal od kojeg su izrađeni valjčići (niskolegirani krom alatni čelik).

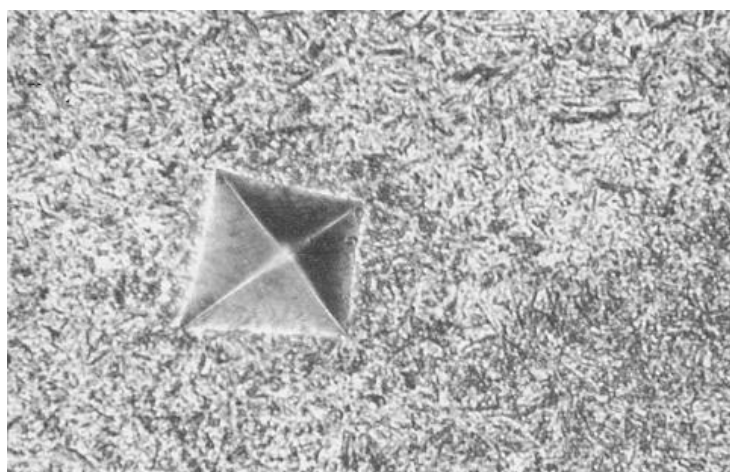
### **5.3. Ispitivanje tvrdoće**

Tvrdoća po Vickersu je mjera otpora što ga neki materijal pruža prodiranju dijamantne četverostrane piramide s vršnim kutom od  $136^\circ$ , opterećene nekom silom  $F$  (u ovom slučaju opterećenje je bio uteg od 200 g).

Udubljenje piramide daje kvadrat na površini uzorka, ali zbog netočnosti rada, nesavršenosti uzorka i sličnog (često puta je kvadrat iskrivljen), mjere se obje dijagonale kvadrata ( $d_1$  i  $d_2$ ) i uzima se srednja vrijednost dijagonale  $d$ .



Slika 57. Tvrdoća po Vickersu (indentor i otisak) [24]



Slika 58. Izgled otiska indentora kod Vickers metode [25]

Mjerenje je za svaki dio (klipnjača i valjčić) provedeno 5 puta i softverskim proračunom su dobivene sljedeće vrijednosti.

523HV0,2 - klipnjača (osnovni materijal)

630HV0,2 - klipnjača (cementirani sloj)

498HV0,2 - valjčić

## **6.ZAKLJUČAK**

Nakon što su uzorci (klipnjača i valjčići) detaljno analizirani (SEM, optička emisijska spektrometrija) i nakon što su obavljena ispitivanja tvrdoće, doneseni su sljedeći zaključci:

- Uslijed lošeg podmazivanja došlo je do pretjeranog trošenja (valjčića ležaja između klipnjače i osovine) i problema u radu motora.
- S fotografija dobivenih SEM analizom je vidljivo da na površini klipnjače postoje “nalijepljene” nakupine materijala.
- Mehanizmi trošenja koji su se javili u ovom slučaju su adhezija i abrazija.

Budući da je adhezijsko trošenje prijelaz materijala s jedne tarne plohe na drugu pri relativnom gibanju, zbog procesa zavarivanja krutih faza, može se zaključiti da je upravo ovaj mehanizam trošenja dominantan u promatranom problemu. “Nalijepljene” nakupine materijala potječu s drugog člana tribopara (valjčići ležaja) za koje je ispitivanjem tvrdoće materijala od kojeg su načinjeni (niskolegirani krom alatni čelik) utvrđeno da imaju niže vrijednosti od tvrdoće materijala klipnjače (konstrukcijski čelik za rad pri povišenim i visokim temperaturama). Također uz adheziju, prisutna je i abrazija. Kao što je već navedeno abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Abrazijsko trošenje je nastupilo nakon adhezijskog jer su “nalijepljenje” nakupine materijala valjčića na klipnjači djelovale kao abraziv u daljnjem procesu trošenja.

## **7. LITERATURA**

- [1] Ivušić, Vinko; Tribologija; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 1998.
- [2] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ae/Diorama\\_cavemen - National Museum of Mongolian History.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ae/Diorama_cavemen_National_Museum_of_Mongolian_History.jpg)
- [3] [http://4.bp.blogspot.com/XnDq\\_1ArrHU/TgZeIq2o0BI/AAAAAAAAAsM/qrD7JEVYmKU/s400/BuildingThePyramids3%255B1%255D.jpg](http://4.bp.blogspot.com/XnDq_1ArrHU/TgZeIq2o0BI/AAAAAAAAAsM/qrD7JEVYmKU/s400/BuildingThePyramids3%255B1%255D.jpg)
- [4] Grilec, Krešimir; Ivušić, Vinko; Tribologija, autorizirana predavanja; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2011.
- [5] [http://www.emeraldinsight.com/content\\_images/fig/0180650606010.png](http://www.emeraldinsight.com/content_images/fig/0180650606010.png)
- [6] <http://business.eagleburgmann.com/lexikon/images/de/f256-1.jpg>
- [7] [http://media.noria.com/sites/archive\\_images/Backup\\_200503\\_OA101-Fig1a.jpg](http://media.noria.com/sites/archive_images/Backup_200503_OA101-Fig1a.jpg)
- [8] [http://www.tricocorp.com/prescription-news/images/newsletter-12-09-page2\\_clip\\_image012.gif](http://www.tricocorp.com/prescription-news/images/newsletter-12-09-page2_clip_image012.gif)
- [9] <http://failure-analysis.info/wp-content/uploads/2010/07/7-micro-soccer-balls.jpg>
- [10] <http://www.gordonengland.co.uk/img/wear3.gif>
- [11] <http://www.scientificequipments.co.in/Demonstration%20Two%20Stroke%20Petrol%20Engine.jpg>
- [12] Marin, Radovan; Tehnologija automobila; Media Print; Zagreb, 2010.
- [13] [http://3.bp.blogspot.com/\\_LapmakrH9kQ/TKIsBKEbcwI/AAAAAAAAAEA/hk1AslcNfSw/s1600/2-stroke.gif](http://3.bp.blogspot.com/_LapmakrH9kQ/TKIsBKEbcwI/AAAAAAAAAEA/hk1AslcNfSw/s1600/2-stroke.gif)
- [14] <http://www.pakwheels.com/forums/bikes-3-wheelers/69034-can-2-stroke-bike-engines-convert-4-stroke>
- [15] <http://static.ddmcdn.com/gif/diesel-two-stroke.gif>
- [16] Halasz, Boris; Uvod u termodinamiku; Predlošci za predavanja, Zagreb, 2006.
- [17] [http://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Real\\_two\\_stroke\\_diagram.gif](http://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Real_two_stroke_diagram.gif)
- [18] [http://www.cartype.com/pics/7746/full/wartburg-353w\\_brochure.jpg](http://www.cartype.com/pics/7746/full/wartburg-353w_brochure.jpg)
- [19] <http://www.global-trade.com.tw/images/Product/LX09-1E36%281%29.jpg>



[20] Metals Handbook, 8th Edition, Volume 7: Atlas of Microstructures of Industrial Alloys; American Society for metals

[21] Filetin, Tomislav; Kovačiček, Franjo; Svojstva i primjena materijala; Sveučilište u Zagrebu; Zagreb, 2009.

[22] [http://www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni\\_materijali/EMUMF/SEM.pdf](http://www.pmf.unsa.ba/fizika/images/nastavni_materijali/EMUMF/SEM.pdf)

[23] <http://www.eos.ca/TS5136.htm>

[24] <http://www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.gif>

[25] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Case\\_hardened\\_steel-vickers\\_hardness\\_test.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Case_hardened_steel-vickers_hardness_test.png)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nada Šućur**

Mat. br.: 0035178059

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje klipnjače koljenastog vratila dvotaktnog motora s vanjskim paljenjem**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear of crankshaft of two-stroke engine with external ignition**

Opis zadatka:

Tribologija je znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja. Njezina su glavna područja primjene: dijelovi mehaničkih konstrukcija (zupčanci, ležaji, klizni elementi), materijali (novi materijali, keramika, polimeri, metali, inženjerstvo površina), obradba materijala (alatni materijali, sredstva za hlađenje i podmazivanje, lakoobradljivi materijali) te podmazivanje (ulja, masti, aditivi). Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama pa je tako prisutno i kod motora s unutarnjim izgaranjem.

U radu je potrebno:

- 1) Opisati mehanizame trošenja.
- 2) Na primjeru klipnjače koljenastog vratila dvotaktnog motora s vanjskim paljenjem potrebno je definirati mehanizme trošenja koji se javljaju u njegovom radu.
- 3) SEM-om analizirati tragove trošenja na klipnjači.

Zadatak zadan:  
11. studenog 2013.

Rok predaje rada:  
1. rok: 21. veljače 2014.  
2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.  
2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Zadatak zadao:

  
Doc.dr.sc. Suzana Jakovljević

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Zoran Kunica